



**Universidade de
Aveiro**
2011

Departamento de Engenharia Civil

**Flávio Filipe Andias
Oliveira**

**COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE
GEOSSINTÉTICOS EM VIAS-FÉRREAS**



**Flávio Filipe Andias
Oliveira**

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE GEOSSINTÉTICOS EM VIAS-FÉRREAS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Dra. Margarida Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Dra. Maria de Lurdes Lopes, Professora Catedrática da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro
Investigador do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

Prof^a. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes
Professora Catedrática da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos

Agradecer por vezes não é suficiente para demonstrar a gratidão pelo apoio, disponibilidade e ajuda concedida. Ainda assim aproveito este espaço para saldar parte da minha dívida reconhecendo todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho, em particular:

- à Professora Doutora Margarida Pinho Lopes, pela orientação, ensinamentos e sugestões valiosas, pela disponibilidade total e apoio prestado durante a realização deste trabalho;
- ao Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e em particular à Professora Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes;
- à Ana Rosete e Ana Seoane pelos ensinamentos e apoio prestado na realização dos ensaios laboratoriais;
- à minha família por ser suporte de tudo o que faço e pretendo fazer na vida;
- à Sandra pela paciência, compreensão, motivação e carinho que sempre soube manifestar nos momentos mais difíceis e pelo acompanhamento na realização da parte experimental;

A todos deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Palavras-chave

Geossintéticos, abrasão, danificação durante a instalação (DDI) , permeabilidade, obras ferroviárias.

Resumo

A aplicação crescente de geossintéticos na área da engenharia civil deve-se, em grande parte, ao facto da sua associação aos materiais naturais se mostrar eficiente sob o ponto de vista mecânico e hidráulico. A utilização destes materiais permite responder, sobretudo, aos requisitos de carácter geotécnico desempenhando várias funções nomeadamente, de separação, drenagem, filtragem, controlo da erosão, protecção, reforço e barreira de fluidos. Algumas destas enquadram-se, plenamente, em obras ferroviárias e o seu emprego tem-se revelado vantajoso, do ponto de vista técnico e económico.

Com este trabalho pretendeu-se contribuir para o conhecimento dos efeitos da danificação durante a instalação (DDI) e da abrasão em geossintéticos utilizados em obras ferroviárias, em particular, na avaliação da permeabilidade no plano e normal ao plano dos geossintéticos. Nesse sentido apresenta-se um estudo laboratorial desenvolvido para avaliar o comportamento de um geotêxtil não tecido, GTX, e de um geocompósito de reforço, GCR. O plano de ensaios compreendeu a avaliação da permeabilidade no plano e normal ao plano de provetes intactos, sujeitos à simulação dos efeitos de DDI, de abrasão e do efeito conjunto de DDI seguido de abrasão. Com a realização dos ensaios de avaliação de permeabilidade no plano demonstrou-se que, para ambos os geossintéticos, como resultado da diminuição da secção de escoamento ocorre uma diminuição do coeficiente hidráulico com o aumento da pressão de compressão. Para o geotêxtil GTX a influência dos processos de danificação é significativa para pressões mais baixas de compressão, em especial o efeito conjunto de DDI e abrasão que provoca o maior aumento do coeficiente hidráulico. Relativamente ao geocompósito GCR a dispersão dos valores obtidos não permite validar estatisticamente os resultados, ainda que se possa afirmar que a influência dos processos de danificação sobre a capacidade de escoamento é bastante reduzida. Os ensaios de avaliação da permeabilidade normal ao plano permitiram concluir que os processos de danificação contribuem para uma diminuição da velocidade de escoamento, sendo que os métodos que provocam maior redução são a abrasão, para o geotêxtil GTX, e o efeito conjunto de DDI e abrasão, para o geocompósito GCR.

Keywords

Geosynthetics, abrasion, damage during installation (DDI), durability, permeability, railways

Abstract

The growing application of geosynthetics in the field of civil engineering results, in large part, from its association with natural materials to be efficient from a mechanical and a hydraulic point of view. The use of these materials allows responding, mainly, to the geotechnical requirements for performing various functions including separation, filtration, drainage, erosion control, reinforcement, protection and fluid/gas containment. Some of these applications fit on railway applications and its use has proved to be advantageous, both in improving the technical of railways as in the decrease in initial and operating costs.

This work aims to contribute to the knowledge of the effects of damage under repeated loading by granular material and abrasion in geosynthetics used in railway construction, in particular as regards to the evaluation of permeability in the plane and normal to the plane of geosynthetics. In this sense a test program was presented, designed to evaluate the behavior of a non-woven geotextile, GTX, and a reinforcement geocomposite, GCR. The test plan included the assessment of permeability in the plane and normal to the plane of different types of samples: intact, subject to the simulation of the effects of DDI, of abrasion and to the combined effect of DDI followed by abrasion. With the completion of tests to assess the permeability in the plane it was shown, for both geosynthetics and as a result of the decreased flow section, that there is a decrease of hydraulic coefficient with the increasing of the compression pressure. For geotextile GTX the influence of the processes of damage is significant to lower compression pressures, especially the combined effect of DDI and abrasion, which causes the greatest increase of the hydraulic coefficient. For geocomposite GCR, the dispersion of the values obtained did not allow to statistically validate the results, although one could argue that the influence of processes of damage on the flow is greatly reduced. Tests for evaluating the permeability normal to the plane led to the conclusion that the processes of damage contribute to a decrease in flow velocity. The methods that contribute to a greater reduction are abrasion, to the geotextile GTX, and the combined effect of DDI and abrasion, for geocomposite GCR.

Índice

1.	Considerações iniciais	13
1.1.	Introdução	13
1.2.	Estrutura da dissertação	14
2.	Introdução aos geossintéticos	15
2.1.	Considerações iniciais	15
2.2.	Tipos de geossintéticos	16
2.3.	Materiais constituintes	17
2.4.	Propriedades	18
2.4.1.	Propriedades hidráulicas	19
2.5.	Principais funções	21
3.	Aplicação de geossintéticos em obras ferroviárias	23
3.1.	Introdução	23
3.2.	Constituição das linhas férreas	24
3.3.	Desempenho de geossintéticos em obras ferroviárias	26
3.3.1.	Introdução	26
3.3.2.	Separação, filtragem e drenagem	27
3.3.3.	Reforço	30
3.4.	Danificação de geossintéticos	31
3.4.1.	Abrasão	31
3.4.2.	Danificação durante a instalação	33
3.5.	Normalização aplicável aos ensaios de geossintéticos	37
4.	Ensaio laboratoriais	39
4.1.	Introdução	39
4.2.	Geossintéticos utilizados no estudo	39
4.3.	Ensaio Hidráulicos	41
4.3.1.	Introdução	41
4.3.2.	Avaliação da permeabilidade	41
4.3.3.	Avaliação da porosidade	61
4.4.	Ensaio de danificação	64
4.4.1.	Introdução	64
4.4.2.	Ensaio de DDI	65

4.4.3.	Ensaio de abrasão	67
5.	Apresentação dos resultados.....	71
5.1.	Programa de ensaios	71
5.2.	Ensaio de permeabilidade no plano do material	71
5.2.1.	Considerações iniciais	71
5.2.2.	Geotêxtil GTX	72
5.2.3.	Geocompósito GCR.....	89
5.3.	Ensaio de permeabilidade normal ao plano do material.....	103
5.3.1.	Considerações iniciais	103
5.3.2.	Geotêxtil GTX	103
5.3.3.	Geocompósito GCR.....	106
6.	Análise de resultados e Conclusões	111
6.1.	Comparação com resultados de outro autor	111
6.2.	Coeficientes de segurança parciais	115
6.3.	Análise ao trabalho laboratorial desenvolvido	117
7.	Desenvolvimentos futuros	121
8.	Referências bibliográficas	123
Anexo A - Relação entre a perda de carga e a velocidade de escoamento para o geotêxtil GTX – gráficos de interpolação e quadros resumo.		129
Anexo B - Relação entre a perda de carga e a velocidade de escoamento para o geocompósito GCR – gráficos de interpolação e quadros resumo.		133

Índice de figuras

Figura 1. Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura [Pinho-Lopes e Lopes, (2010),].	16
Figura 2. Representação esquemática da principais funções que um geossintético pode desempenhar: a) Separação; b) Drenagem; c) Filtragem; d) Reforço; e) Barreira de fluidos; f) Controlo da erosão superficial [Pinho-Lopes e Lopes, (2010),].	22
Figura 3. Corte esquemático da secção de uma via-férrea convencional: a) longitudinal; b) transversal [Aursudkij, (2007),].	24
Figura 4. Mecanismo de distribuição de cargas das rodas dos carris e dos carris à estrutura [Aursudkij, (2007),].	25
Figura 5. Funcionalidades dos geossintéticos nas vias-férreas [Pimentel, <i>et al.</i> , (2010),].	27
Figura 6. Representação gráfica da função de separação, filtragem e drenagem de geossintéticos aplicados às vias-férreas Pimentel, <i>et al.</i> , (2010),.	28
Figura 7. Esquema representativo do equipamento em escala real “Vibrogir” (adaptado de Nancey, <i>et al.</i> , (2002),).	29
Figura 8. Evolução da permeabilidade normal com a duração do carregamento no “Vibroir” (adaptado de Nancey, <i>et al.</i> , (2002),).	30
Figura 9. Evolução da transmissividade (adaptado de Nancey <i>et al.</i> , 2002),).	30
Figura 10. Equipamento para simulação da abrasão sofrida pelos geossintéticos em aplicações ferroviárias [NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)),].	33
Figura 11. Materiais utilizados no estudo: a) GTX; b) GCR.	40
Figura 12. Permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla, (2002),).	41
Figura 13. Permeabilidade no plano perpendicular ao do material (adaptado de Shukla, (2002),).	42
Figura 14. Esquemas típicos de aparelhos [NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)),].	43
Figura 15. Aparelho disponível no LGS da FEUP para ensaiar a permeabilidade no plano do geossintético.	44
Figura 16. Exemplos de curvas de coeficiente hidráulico versus tensão normal de compressão [NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)),]	46
Figura 17. Exemplo de provetes, de dimensões $0,2 \times 0,3 \text{ m}^2$, para ensaio de permeabilidade no plano do material: a) geotêxtil GTX; b) geocompósito GCR.	50

Figura 18. Medidor de espessura anexo ao prato de carga.	52
Figura 19. Exemplos de aparelhos para o método de carga hidráulica constante (NP EN ISO 11058: 2003): a) horizontal; b) vertical; c) aberto.	54
Figura 20. Aparelho disponível no LGS da FEUP para ensaiar a permeabilidade normal ao plano do geossintético.	55
Figura 21. Exemplo de representação gráfica da perda de carga em função da velocidade, V_{20}	56
Figura 22. Sistema de aperto do provete: a) sistema montado; b) Sistema desmontado; c) Grelha de fixação.	59
Figura 23. Sistema de regulação da perda de carga: a) tubos piezométricos; b) sistema de ajuste; c) escala graduada.	60
Figura 24. Equipamento para realização do ensaio de porometria: a) mesa vibratória; b) sistema de fixação do provete.	63
Figura 25. Equipamento de simulação da DDI: a) vista geral do equipamento; b) caixa de danificação e placa metálica; c) material granular sintético.	67
Figura 26. Equipamento laboratorial para simulação da abrasão de acordo com a NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)),	68
Figura 27. Etapas para realização do ensaio de abrasão: a) fixação do provete à placa deslizante; b) fixação da película abrasiva à placa estacionária; c) colocação da placa superior sobre a placa deslizante; d) carregamento da placa superior com os pesos.	69
Figura 28. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.	73
Figura 29. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.	74
Figura 30. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.	74
Figura 31. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de DDI em laboratório.	75
Figura 32. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.	77
Figura 33. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.	77
Figura 34. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.	77

Figura 35. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de abrasão em laboratório.	78
Figura 36. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.	80
Figura 37. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.	80
Figura 38. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.	80
Figura 39. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de abrasão em laboratório.	81
Figura 40. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.	82
Figura 41. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.	83
Figura 42. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.	83
Figura 43. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.	85
Figura 44. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.	86
Figura 45. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.	87
Figura 46. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.	87
Figura 47. Comparação do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.	88
Figura 48. Comparação do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.	89
Figura 49. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos do geocompósito GCR.	90

Figura 50. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes intactos do geocompósito GCR.	91
Figura 51. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de DDI em laboratório.	92
Figura 52. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geocompósito GCR.	93
Figura 53. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geocompósito GCR.	94
Figura 54. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de abrasão em laboratório.	95
Figura 55. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geocompósito GCR.	96
Figura 56. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geocompósito GCR.	96
Figura 57. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de DDI e abrasão em laboratório.	97
Figura 58. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR.	98
Figura 59. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR.	99
Figura 60. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 0,1.	100
Figura 61. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 1,0.	101
Figura 62. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 0,1.	102
Figura 63. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 1,0.	102
Figura 64. Exemplos de provetes do geotêxtil GTX: a) intactos; b) sujeitos a DDI; c) sujeitos a abrasão; d) sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	104

Figura 65. Representação gráfica dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , em função da perda de carga para os provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão, para o geotêxtil GTX.	106
Figura 66. Exemplos de provetes do geocompósito GCR: a) intactos; b) sujeitos a DDI; c) sujeitos a abrasão; d) sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	107
Figura 67. Representação gráfica dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , em função da perda de carga para os provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão, para o geocompósito GCR.	109
Figura 68. Coeficiente hidráulico em função da pressão normal para provetes intactos e após DDI do geocompósito de reforço, Silva, (2010),.	114

Índice de tabelas

Tabela 1. Descrição dos processos de abrasão (adaptado de Van Dine <i>et al.</i> , 1982 por Pinto, (2005),).	32
Tabela 2. Propriedades dos geotêxteis estudados (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes, (2010),).	34
Tabela 3. Dimensão característica das aberturas (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes, (2010),).	35
Tabela 4. Permeabilidade no plano dos geotêxteis na direcção de fabrico (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes 2010).	36
Tabela 5. Permeabilidade no plano dos geotêxteis na direcção perpendicular à de fabrico (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes 2010).	36
Tabela 6. Normas a ter como referência (adaptado de Moreira, (2009),).	38
Tabela 7. Propriedades nominais dos geossintéticos estudados, na direcção de fabrico.	41
Tabela 8. Plano de ensaios realizado.	71
Tabela 9. Valores médios e do coeficiente de variação do coeficiente hidráulico, da transmissividade e do coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX intactos.	72
Tabela 10. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos a DDI.	76
Tabela 11. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos a abrasão.	79
Tabela 12. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	82
Tabela 13. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente hidráulico para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	85
Tabela 14. Quadro resumo dos valores médios da transmissividade para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	86

Tabela 15. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	88
Tabela 16. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR intactos.	90
Tabela 17. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos a DDI.	93
Tabela 18. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos a abrasão.	95
Tabela 19. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	98
Tabela 20. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente hidráulico para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	100
Tabela 21. Quadro resumo dos valores médios da transmissividade para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	101
Tabela 22. Quadro resumo dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , do índice de velocidade, VI_{H50} , e da permissividade, ψ , de provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	105
Tabela 23. Quadro resumo dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , do índice de velocidade, VI_{H50} , e da permissividade, ψ , de para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.	109
Tabela 24. Quadro comparativo entre os valores do coeficiente hidráulico para provetes intactos e sujeitos a DDI dos geocompósitos apresentados neste trabalho e por Silva, (2010).	113

Tabela 25. Quadro comparativo entre os valores médios da velocidade de escoamento para provetes intactos e sujeitos a DDI dos geocompósitos apresentados neste trabalho e por Silva, (2010).	114
Tabela 26. Coeficientes de segurança parciais obtidos neste trabalho	117

Simbologia

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

LGS – Laboratório de Geossintéticos da Universidade do Porto;

C.V. – coeficiente de variação;

CS_{DDI} – Coeficiente de segurança parcial que representa o efeito da danificação que ocorre durante a instalação do geossintético em obra;

CS_{ABR} – Coeficiente de segurança parcial que contabiliza o efeito da abrasão;

$CS_{DDI+ABR}$ – Coeficiente de segurança parcial que contabiliza o efeito combinado (simultâneo) da danificação durante a instalação e da abrasão;

m.u.a. – Massa por unidade de área;

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1.Introdução

A cada dia novas técnicas e novas aplicações surgem em Engenharia Civil, em função da diversidade e versatilidade das obras, de forma a garantir soluções viáveis do ponto de vista da segurança, do propósito e da estética. Estas tentam sempre rentabilizar, ao máximo, os recursos empregues e minorar o impacto sobre o meio. Atendendo a este facto surgiram os geossintéticos como materiais produzidos numa escala industrial capaz de fazer face, maioritariamente, aos requisitos de carácter geotécnico desempenhando várias funções, nomeadamente, de separação, filtragem, controlo da erosão, protecção, reforço e barreira de fluidos.

Algumas destas enquadram-se, plenamente, em obras ferroviárias e o seu emprego tem-se revelado vantajoso, tanto no aperfeiçoamento das capacidades técnicas das vias-férreas como na diminuição dos custos iniciais e de exploração.

No caso de obras ferroviárias, os geossintéticos ficam submetidos a acções dinâmicas que podem ter grande influência nas suas propriedades e que podem induzir abrasão nos geossintéticos. Por outro lado, os efeitos dos procedimentos de instalação em obra também são importantes, nomeadamente para os geossintéticos instalados em contacto com o balastro. Estes efeitos podem ser muito importantes e, em geral, implicam reduções imediatas e significativas das propriedades dos geossintéticos, [Rosete (2010)].

A aplicação de geossintéticos, em obras ferroviárias, é neste trabalho particularizada ao estudo das propriedades hidráulicas destes materiais quando sujeitos a acções dinâmicas abrasivas e aos efeitos dos procedimentos de danificação durante a instalação por contacto com o balastro. A análise das propriedades hidráulicas traduzir-se-á na caracterização da permeabilidade no plano e normal ao plano e na proposta de valores para os coeficientes parciais de segurança para estas propriedades a usar no dimensionamento. Desta forma pretende-se, com este trabalho, contribuir para o aprofundar do conhecimento nesta área e promover os geossintéticos como solução cada vez mais válida na resposta aos desafios impostos pela engenharia.

1.2.Estrutura da dissertação

A organização deste trabalho faz-se por divisão de toda a matéria abordada em sete capítulos. O primeiro inclui uma primeira introdução ao tema de forma genérica e desenvolve os objectivos que se pretendem alcançar e de que forma se pode contribuir para o aprofundar do estudo nesta área. O segundo refere-se à temática dos geossintéticos, definindo quais os principais tipos, materiais constituintes, funções e propriedades dos geossintéticos com especial atenção às propriedades hidráulicas. O terceiro capítulo concretiza a aplicação dos geossintéticos às vias-férreas relacionando a constituição das mesmas com o desempenho dos geossintéticos e com os fenómenos de danificação. No quarto capítulo faz-se uma descrição dos ensaios laboratoriais realizados, tanto os hidráulicos como os de danificação, e referem-se os geossintéticos escolhidos para este estudo. No quinto capítulo são apresentados os resultados, com detalhe do programa de ensaios e apresentação dos valores obtidos para os ensaios de permeabilidade no plano e normal ao plano dos provetes intactos, submetidos a DDI e abrasão. O sexto capítulo trata das conclusões pelo que se faz uma análise ao trabalho laboratorial desenvolvido, apresentam-se alguns coeficientes de segurança parciais e ainda se faz a comparação com resultados de outro autor. Por último no sétimo capítulo expõem-se algumas reflexões acerca de possíveis trabalhos e ideias a desenvolver no futuro.

2. INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS

2.1.Considerações iniciais

O estudo etimológico do termo geossintético explica em grande medida o significado actual da palavra, o radical grego “geo” traduz-se como terra e “sintético” define-se como uma porção combinada obtida de forma artificial.

Desta forma a Sociedade Internacional de Geossintéticos adoptou o termo para se referir aos materiais poliméricos, naturais ou sintéticos, que podem ser usados em contacto com materiais naturais ou qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil, [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Os geossintéticos desenvolveram-se num contexto histórico que acompanhou a evolução técnica dos materiais e dos sistemas construtivos.

Segundo Ferreira Gomes (2001) a primeira aplicação de um geotêxtil tecido de algodão, em reforço de estradas, nos Estados Unidos, ocorreu por volta de 1930 Beckam e Mills (1935). O aparecimento do polímero sintético verificou-se nos anos 40. A primeira aplicação de um geotêxtil de fibras sintéticas data de 1950, na Flórida Barret (1996). Na Europa, a aplicação de geotêxteis tecidos Gicot e Perfetti (1982) data de 1960 na Holanda, e de geotêxteis não tecidos em 1969 na França Vantrain e Puig (1969). É após a década de 70, que se verifica um grande desenvolvimento com o aparecimento de outros materiais como as geomembranas, geogrelhas, geocompósitos e outros, tendo levado ao termo geossintético já nos anos 80, como uma designação mais genérica, englobando portanto os geotêxteis, as geomembranas e todos os produtos afins [Ferreira Gomes (2001)].

Em Portugal, o impacto dos geossintéticos, fez-se também sentir em diferentes vertentes de aplicação com crescente importância que resultou na criação em 1999 do Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, na criação da Associação Portuguesa de Geossintéticos (IGS) [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.2. Tipos de geossintéticos

Ao utilizar geossintéticos é fundamental, para garantir a escolha mais adequada ao fim que se pretende, conhecer os diversos tipos de geossintéticos que existem e fazer a sua distinção segundo o processo de fabricação e estrutura resultante. Deve ainda atender-se às características dos componentes de base usados no fabrico, nomeadamente, o tipo de polímeros e os aditivos.

Assim, os geossintéticos podem ser classificados relativamente à sua estrutura, dividindo-se em: geomembranas ou barreiras geossintéticas poliméricas, geotêxteis, produtos relacionados e geossintéticos compósitos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)]. Na Figura 1 é apresentada uma classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura.

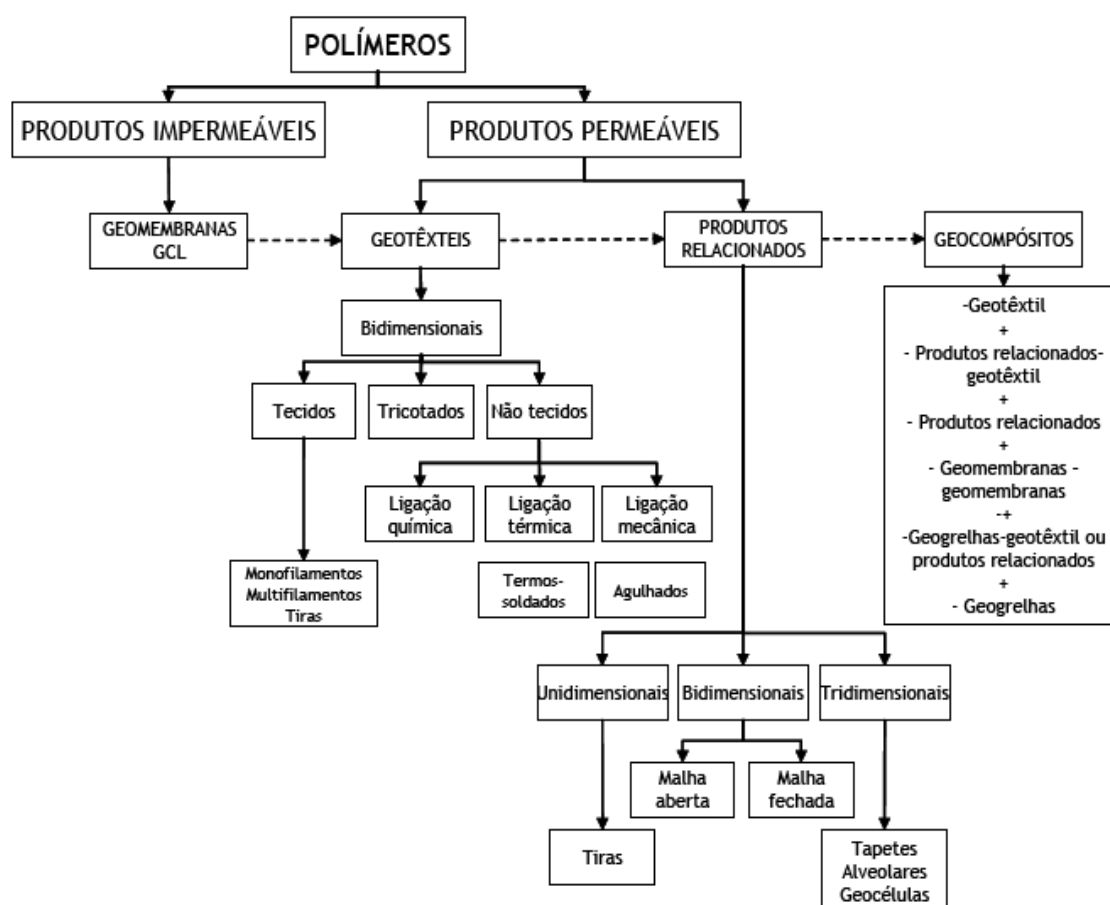


Figura 1. Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.3. Materiais constituintes

As matérias-primas empregues na produção de geossintéticos têm origem natural ou química.

Em relação às matérias-primas naturais estas podem ter proveniência vegetal, animal e mineral (lã, seda, algodão, linho, amianto). Já as matérias-primas químicas derivam de polímeros naturais transformados ou polímeros sintéticos, no caso de serem orgânicas, e minerais, no caso de inorgânicas.

Tendencialmente os materiais orgânicos sintéticos são os mais utilizados no fabrico de geossintéticos incluindo-se os materiais sintetizados a partir do petróleo, vulgarmente designados por plásticos. Estes apresentam uma constituição macrocelular dotada de maleabilidade e facilmente transformável por acção do calor e pressão. De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010) as suas características de fusão agrupam-se em dois tipos, termoendurecidos e termoplásticos, pelo que, estes últimos são os mais utilizados no fabrico de geossintéticos.

Os termoplásticos podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento, respectivamente. Por sua vez, os plásticos termoendurecidos quando endurecem, partindo do estado fundido, não podem amolecer por acção do calor [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Em síntese, a grande generalidade dos geossintéticos, têm por base fibras de polímeros sintéticos, em particular, plásticos do tipo termoplásticos, constituídos por reacções de polimerização em que moléculas menores (monómeros) se combinam para formar moléculas longas. No geral, os componentes básicos que formam a composição química dessas moléculas são carbono e hidrogénio.

Segundo Ferreira Gomes (2001) a designação dos polímeros sintéticos bem como a sigla pelo qual são muitas vezes conhecidos, é a seguinte:

- PET- Poliéster
- PA- Poliamida
- PE- Polietileno
- PEMBD- Polietileno de baixa densidade
- PEMD- Polietileno de média densidade
- PEAD- Polietileno de alta densidade
- PP- Polipropileno

PS- Polistireno

PVC- Cloreto de Polivinilo

ECB- Copolimero de etileno com betume

CPE- Polietileno Clorado

O PVC, ECB e CPE só são usados para fabrico de geomembranas.

2.4. Propriedades

O correcto dimensionamento e aplicação de geossintéticos em obra, de forma a garantir plena funcionalidade, pressupõem o conhecimento das suas propriedades elementares. Estas, segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010) podem ser divididas em: físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade.

O enquadramento normativo destas propriedades é segundo Pinto (2005) mensurável e objecto de controlo e certificação. Os geossintéticos são materiais que estão abrangidos pela Directiva Europeia dos Produtos de Construção (Directiva 89/106/CEE), que transporta para a legislação nacional pelo DEC. Lei nº113/93, a qual impõe que para todos os materiais/produtos utilizados nas obras de construção seja obrigatória a marcação CE [Pinto (2005)].

No que toca às propriedades físicas dos geossintéticos, segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010) enumeram-se as seguintes: a densidade relativa dos polímeros, a massa por unidade de área e a espessura dos geossintéticos. É importante destacar a influência que a temperatura e a humidade têm na obtenção de resultados comparáveis, pelo que, é aconselhável mesmo quando se recorre a procedimentos semelhantes controlar esses agentes.

Em relação às propriedades mecânicas, particularmente importantes quando se trata de situações de reforço, estas estão associadas às solicitações dinâmicas que podem ser de três tipos: esforços de tracção ou compressão (esforços distribuídos), punçoamento (esforços concentrados) e rasgamento (esforços concentrados e esforços distribuídos) [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

As propriedades relativas à durabilidade traduzem-se, em termos gerais, pela aptidão que um material tem em conservar certas propriedades desde a conclusão do seu processo de fabrico, aplicação em obra, fase de exploração e término do seu período de vida útil.

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010) faz-se a distinção entre dois subtipos de propriedades relativas à durabilidade de geossintéticos, o primeiro respeitante à sua resistência durante o tempo de vida útil, e o segundo relativo à sua resistência à degradação. Em relação ao primeiro incluem-se: a danificação que os geossintéticos sofrem durante a sua instalação em obra, a fluência, a relaxação de tensões, a abrasão e a fluência em compressão. Em relação ao segundo consideram-se a resistência às radiações ultra-violeta, à acção da temperatura, à oxidação, à hidrólise, aos agentes químicos e aos agentes biológicos.

Por último, referem-se as propriedades hidráulicas, nomeadamente a distribuição e dimensão de aberturas, que apesar de ser uma propriedade física condiciona o comportamento hidráulico, a permeabilidade à água normal ao plano, permeabilidade ao longo do seu plano, permeabilidade ao ar e a capacidade de filtragem dos solos.

No desenvolvimento deste trabalho, faz-se um enquadramento mais contextualizado às obras ferroviárias das propriedades em estudo, designadamente da dimensão característica das aberturas, permeabilidade no plano e normal ao plano e da influência da abrasão e danificação durante a instalação (DDI).

2.4.1. Propriedades hidráulicas

2.4.1.1. Distribuição e dimensão das aberturas

Alguns geossintéticos (geogrelhas, georredes) apresentam aberturas uniformes considerando-se o seu tamanho suficiente para caracterizar a dimensão das aberturas do material em causa. Pelo contrário, as aberturas de um geotêxtil tecido ou não tecido, entre outros, não possuem um tamanho único, mas sim um intervalo de tamanhos. Atendendo, então, à distribuição pouco regular, a caracterização das dimensões das aberturas recorre a curvas semelhantes às usadas para representar a granulometria de um solo. Essa representação da distribuição e dimensão das aberturas de um geossintético (em particular, geotêxtil) designa-se por porometria.

De acordo com a norma NP EN ISO 12956: 2006 (Ed.1)) (Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da dimensão característica da abertura), a determinação da distribuição e dimensão das aberturas é feita recorrendo a uma peneiração húmida de um material granular de dimensões conhecidas através de provetes de geossintético. O

material passado é isolado e pesado. Finalmente, são desenhadas as curvas de distribuição da dimensão das partículas que passam através do geossintético.

Em geral, o diâmetro das aberturas é expresso em mm ou em μm e os seus valores usuais estão entre 0,06 e 0,15mm para geotêxteis não tecidos e entre 0,05 e 1,5mm para os geotêxteis tecidos.

A partir das curvas referidas pode ainda definir-se um parâmetro importante: a dimensão característica da abertura, representada por O_n (em geral, n tem o valor de 90%). Este parâmetro representa a dimensão que é maior do que $n\%$ das aberturas do geotêxtil [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.4.1.2. Permeabilidade à água normal ao plano

A permeabilidade à água normal ao plano dos geossintéticos é uma propriedade muito relevante para a função de filtragem, em que a água passa através do geossintético, perpendicularmente ao seu plano. O fluxo de água através do geossintético pode ocorrer em condições estacionárias (independente do tempo), isto é, fluxo constante para altura de água constante, ou em condições não estacionárias, ou seja, com altura de água decrescente.

O ensaio de determinação da permeabilidade à água normal ao plano é realizado de acordo com a NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) (Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento), ou seja, com perda de carga constante.

A permeabilidade à água normal ao plano depende da estrutura das aberturas (distribuição e dimensão), apresentando, usualmente, valores para os geotêxteis tecidos entre 0,01 e 0,75mm/s e entre 0,1 e 12,5mm/s para os não tecidos Pinho-Lopes e Lopes (2010).

2.4.1.3. Permeabilidade ao longo do seu plano

A transmissividade é a propriedade que caracteriza as condições de escoamento no plano do geossintético e contribui para a função de drenagem. Os procedimentos para a sua avaliação vêm descritos na NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) (Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano).

A transmissividade depende da espessura (e , portanto, das pressões aplicadas ao geossintético) e da distribuição e dimensão das aberturas. Então, enquanto nos

geotêxteis tecidos e não tecidos termicamente ligados a transmissividade é pequena, nos geotêxteis não tecidos agulhados e nas georredes esse parâmetro é elevado. Este facto justifica a utilização destes últimos materiais como drenos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.5.Principais funções

Os geossintéticos são materiais muito funcionais, fundamentalmente fabricados para serem utilizados em aplicações na área da engenharia geotécnica, geoambiental, hidráulica e de transporte.

Segundo a norma EN ISO 10318: 2005) (Geossintéticos. Termos e definições), as principais funções que podem ser desempenhadas pelos geossintéticos são separação, filtragem, drenagem, protecção, reforço, controlo de erosão superficial ou estanquidade. A função de estanquidade é exclusiva das geomembranas e de alguns geocómpósitos [Rosete (2010)].

Atendendo ao tipo de aplicação, um geossintético pode desempenhar conjuntamente mais do que uma função, e torna-se importante definir de acordo com as exigências funcionais pretendidas, aquelas que são principais e secundárias.

De acordo com Bathurst (2010) destacam-se seis funções principais que os geossintéticos podem desempenhar: separação, drenagem, filtragem, reforço, barreira de fluidos e controlo de erosão superficial. Estas funções são descritas de seguida e estão representadas, graficamente, na Figura 2

A função de separação baseia-se na separação de duas camadas de solos ou materiais de aterro que têm diferentes granulometrias, por actuação de um geossintético.

A função de drenagem consiste na actuação do geossintético como um dreno para transportar um fluido, ao longo do seu plano, através de solos menos permeáveis por um certo período de tempo.

A função de filtragem envolve a movimentação de fluidos através do geossintético actuando, simultaneamente, na retenção de solo e de outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas.

A função de reforço permite que a aplicação de um geossintético actue como elemento de reforço dentro de uma massa de solo, ou em combinação com o solo, de forma a produzir um composto com propriedades melhoradas de resistência e deformação.

A função de barreira de fluidos permite que o geossintético influa como uma barreira relativamente impermeável a líquidos ou gases.

A função de controlo da erosão permite ao geossintético reduzir a erosão causada pelo impacto da chuva e do escoamento das águas superficiais.

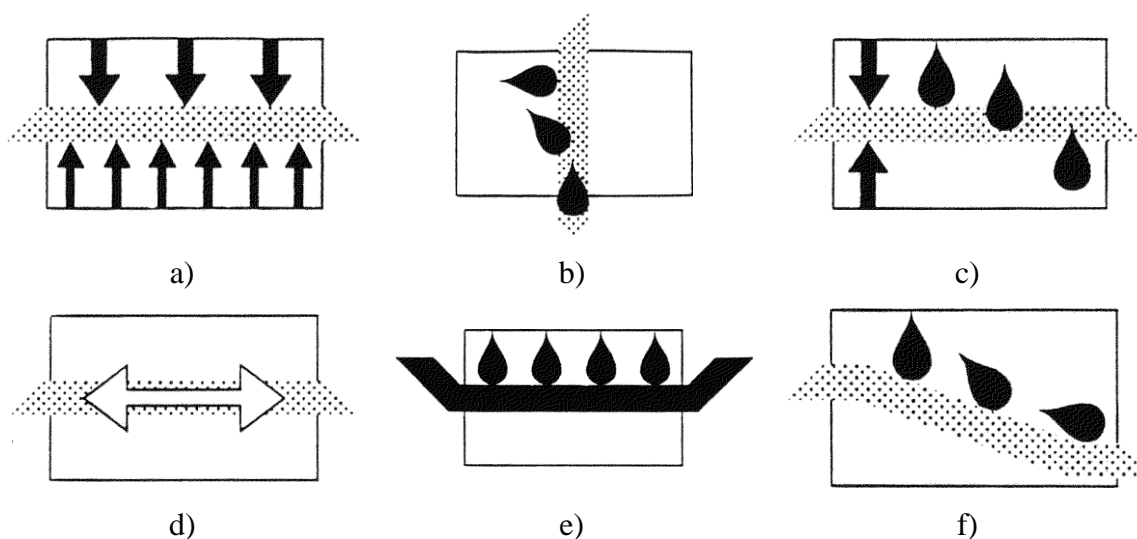


Figura 2. Representação esquemática das principais funções que um geossintético pode desempenhar: a) Separação; b) Drenagem; c) Filtragem; d) Reforço; e) Barreira de fluidos; f) Controlo da erosão superficial [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

3. APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS FERROVIÁRIAS

3.1.Introdução

A complexidade de projectar e de dimensionar, as estruturas dos pavimentos e das vias-férreas, afigura-se na área da Engenharia civil como uma das mais problemáticas.

Estas estruturas, de acordo com a sua especificidade, são construções lineares traçadas sobre o terreno, em que a incerteza e variabilidade acerca das propriedades e das características englobam vários parâmetros. Pode-se destacar o tipo de terreno, que pode variar entre solos ou rochas, os materiais naturais utilizados, e ainda a influência das cargas aplicadas, particularmente com a repetição do carregamento durante o tempo de vida útil da estrutura, e do facto de serem cargas rolantes.

Ao considerar então, as singularidades das obras ferroviárias, é legítimo pensar nos geossintéticos como uma solução técnica, economicamente viável, capaz de constituir uma opção de projecto em várias estruturas que constituem uma via-férrea.

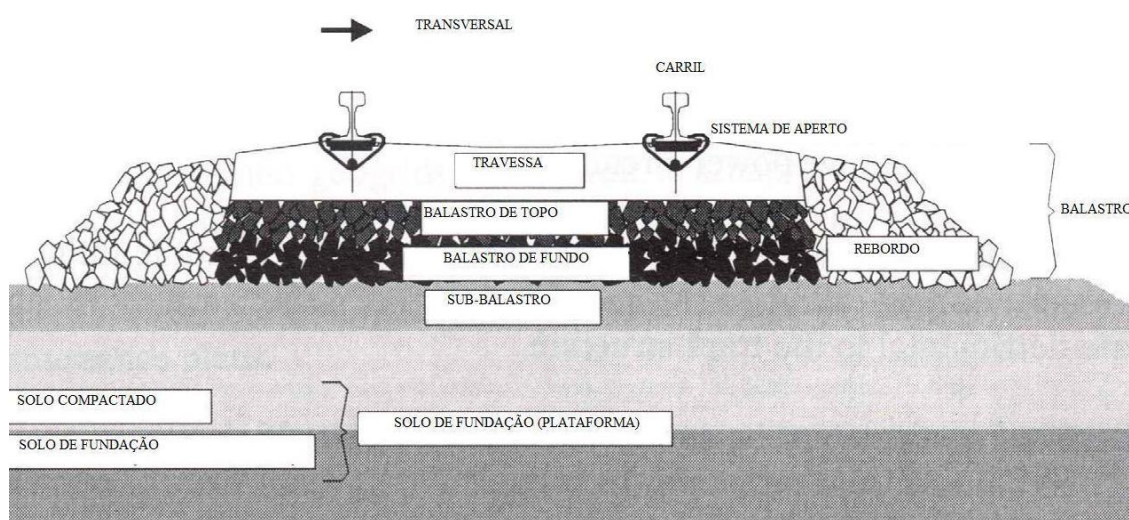
Segundo Lopes (2009) as vantagens de aplicação de geossintéticos em linhas férreas que reúnem maior consenso são:

- permitir aumentar os intervalos de manutenção do material da camada de balastro;
- controlar o fenómeno de contaminação do balastro;
- permitir reduzir os deslocamentos horizontais e transversais da camada de balastro;
- reduzir os assentamentos diferenciais na camada de balastro;
- minorar o impacto ambiental, associado à exploração de pedreiras;
- reduzir custos iniciais e de exploração;
- maior disponibilidade de materiais e maior facilidade e rapidez de aplicação.

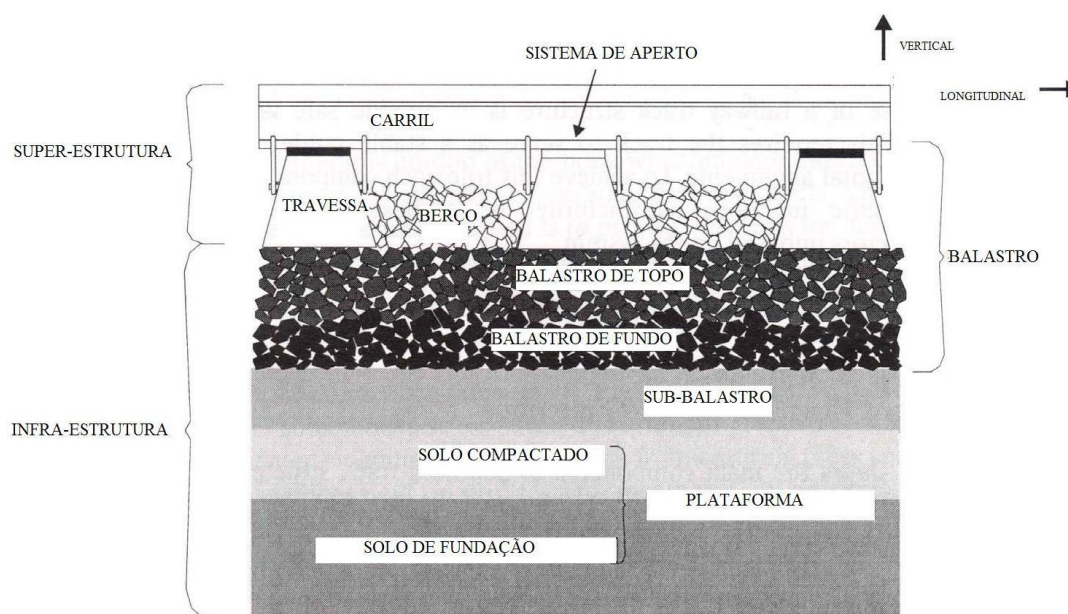
3.2. Constituição das linhas férreas

Segundo Lopes (2009) a generalidade das vias-férreas é constituída por dois grandes grupos de elementos, a infra-estrutura e a super-estrutura. A parte da super-estrutura engloba os carris, as travessas e os sistemas de fixação e ligação. A infra-estrutura abrange as camadas de balastro, sub-balastro, a plataforma onde a estrutura é apoiada, onde se podem incluir ainda as obras de arte, os passeios e valetas.

A Figura 3 apresenta um corte esquemático longitudinal e transversal de uma secção de uma linha férrea convencional.



a)



b)

Figura 3. Corte esquemático da secção de uma via-férrea convencional: a) longitudinal; b) transversal [Aursudkij (2007)].

Segundo Aursudkij (2007) os carris são um par de vigas de aço laminado, dispostas longitudinalmente, que contactam directamente com as rodas das carruagens. As suas funções são as de guiar os comboios na direcção desejada, e transferir a carga do tráfego para as travessas que estão ligadas aos carris por sistemas de fixação. As travessas, por seguimento, transferem a carga dos carris para o balastro, e restringem a circulação ferroviária através da ancoragem da super-estrutura. Na Figura 4 representa-se o mecanismo de distribuição de cargas das rodas aos carris e à estrutura.

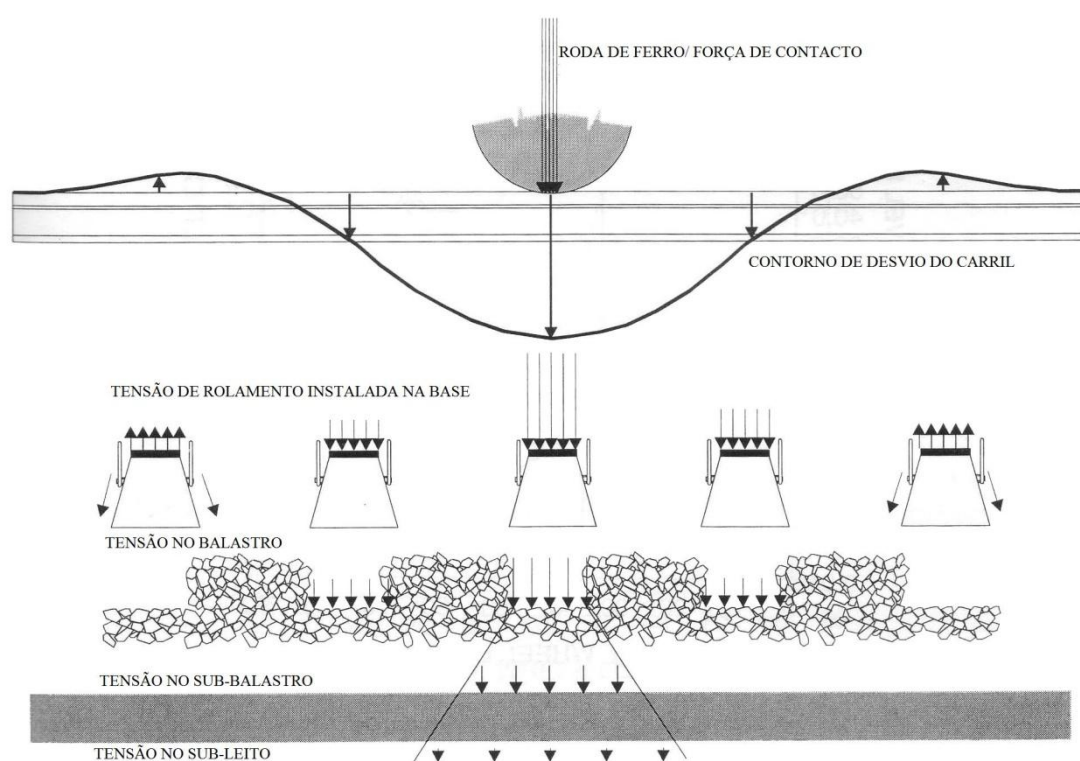


Figura 4. Mecanismo de distribuição de cargas das rodas dos carris e dos carris à estrutura [Aursudkij (2007)].

Segundo Lopes (2009) a camada de balastro é constituída por material granular, com uma espessura variável geralmente entre os 25 e os 30 cm, sendo o desempenho das suas funções de especial importância para o correcto funcionamento de toda a estrutura. As principais funções que geralmente lhe estão atribuídas são:

- suportar os componentes que constituem a super-estrutura, mantendo-os nas suas respectivas posições, ao mesmo tempo que garante a degradação das cargas que lhe são transmitidas pelas travessas;

- drenar as águas chegadas à plataforma para valas ou drenos laterais, e garantir a protecção contra os efeitos do gelo;
- garantir resiliência e absorção de energia, para que se dê o eficaz amortecimento das vibrações produzidas pela passagem dos comboios;
- permitir, através de operações de manutenção, a correcção, tanto longitudinal como transversal, da geometria da via;
- garantir a estabilidade longitudinal e transversal da via.

Semelhante ao balastro, o sub-balastro é também um material granular, mas geralmente mais fino e que aparece abaixo da camada de balastro. Esta camada contacta directamente com a plataforma e, tal como o balastro, funciona na redução dos níveis de tensão. Além desta função, Lopes (2009) afirma que a camada de sub-balastro desempenha ainda as seguintes funções:

- prevenir a interpenetração do balastro na plataforma (função de separação) e evitar, na presença de água, o fenómeno de bombeamento de lama, sob a acção das cargas do tráfego;
- prevenir a subida de finos a partir da plataforma (função de filtro);
- criar uma fronteira de menor permeabilidade, com inclinação transversal, capaz de garantir o escoamento lateral das águas da plataforma.

À semelhança de outro tipo de fundações, a camada de sub-balastro deve garantir que não existem assentamentos excessivos.

A plataforma é o último elemento da infra-estrutura, que suporta todas as outras partes da estrutura. Esta camada deve assegurar estabilidade para as camadas de balastro e sub-balastro, estar devidamente regularizada, e garantir características geológicas adequadas ao armamento da via.

3.3.Desempenho de geossintéticos em obras ferroviárias

3.3.1. Introdução

Segundo Pimentel, *et al.* (2010) a utilização de geossintéticos em vias-férreas abarca quase todas as funcionalidades possíveis de ser desempenhadas por estes materiais, e

constitui parte integrante dos diversos elementos que constituem uma via-férrea (Figura 5).

As funções de separação, filtragem e drenagem são, geralmente, desempenhadas por geotêxteis, e a função de reforço, para além de geotêxteis, pode ser realizada por geogrelhas, geocélulas e geocompósitos.

A aplicação destes materiais, os mecanismos de desgaste e danificação, e o seu desempenho são, desde que se começou a usar este material nas vias-férreas, objecto de estudos laboratoriais a pequena escala, à escala real e “in situ”. Desta forma parece ser apropriado referir, como desenvolvimento, alguns estudos que vão de encontro às funcionalidades dos geossintéticos e ao tema deste trabalho.

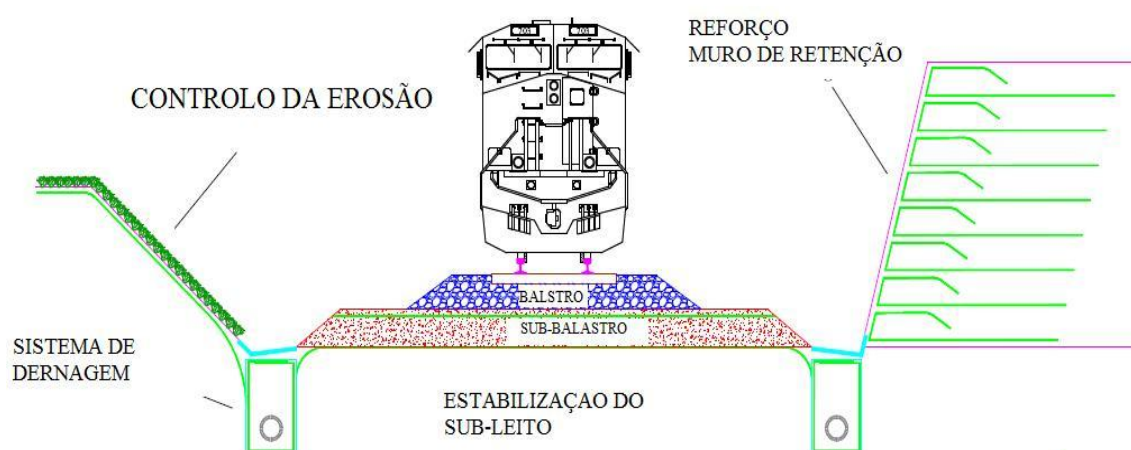


Figura 5. Funcionalidades dos geossintéticos nas vias-férreas [Pimentel, *et al.* (2010)].

3.3.2. Separação, filtragem e drenagem

Tal como se referiu atrás, para a função de separação, filtragem e drenagem os geotêxteis são os materiais mais utilizados. Pode ainda recorrer-se a geocompósitos drenantes.

Segundo Pimentel, *et al.* (2010) na função de separação os geotêxteis são usados para separar camadas de base, com granulometria e propriedades diferentes. A passagem de comboios nos carris introduz à estrutura movimentos oscilatórios que provocam a ascensão dinâmica dos materiais mais finos do subleito. A mistura destes materiais mais finos com as camadas granulares de balastro reduz, consideravelmente, a capacidade de amortecimento das cargas, e a capacidade de drenagem. A introdução de geotêxteis contribui, portanto, para a redução da penetração das partículas mais finas nas camadas

granulares e permite manter a espessura destas camadas de forma a conservar a sua integridade, conseguindo-se, como resultado último, o aumento da vida útil da via-férrea. Importa referir, também, que os geossintéticos adoptados devem assegurar uma capacidade resistente à concentração de forças, e a dimensão das aberturas deve ser compatível com o tamanho das partículas do material a ser retido.

Em relação à função de filtragem, de acordo com Pimentel, *et al.* (2010) esta verifica-se quando, por aumento dos níveis de carga resultantes da passagem de comboios, a água aflui do subleito para as camadas granulares arrastando partículas de solo mais finas. Neste caso o geotêxtil actua como um filtro permitindo a percolação da água e restringindo a passagem de partículas sólidas. De acordo com esta função o geotêxtil considerado deve ter uma permeabilidade adequada às propriedades de retenção e ser resistente à obstrução.

A função de drenagem é segundo Pimentel, *et al.* (2010) especialmente relevante, na medida em que contribui para evitar a deterioração devido à acção da água, proveniente tanto da precipitação como a resultante da ascensão por bombeamento. O geossintético de drenagem deve ser instalado em pontos relevantes da estrutura, de forma transversal à via e deve evitar a acumulação de água. O geossintético escolhido deve apresentar uma elevada capacidade de descarga e ser resistente a danos mecânicos.

Na Figura 6 apresentam-se esquematicamente as funções de separação, filtragem e drenagem de geossintéticos.

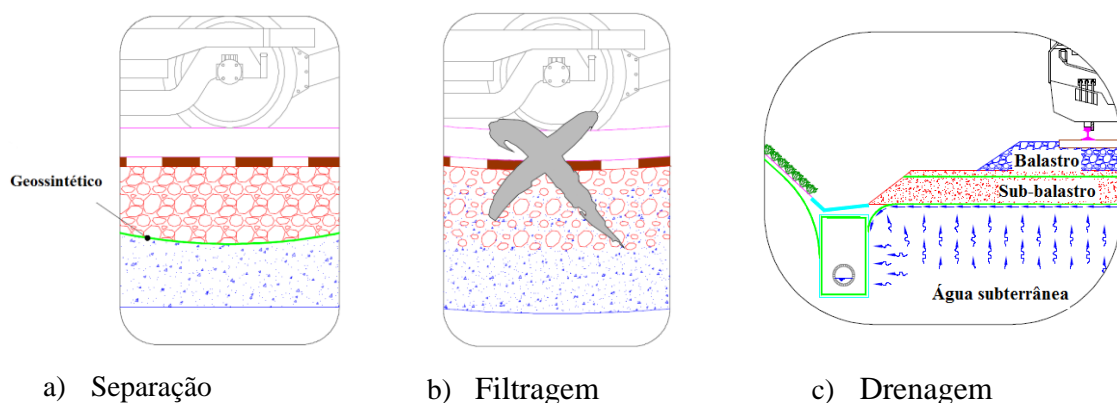


Figura 6. Representação gráfica da função de separação, filtragem e drenagem de geossintéticos aplicados às vias-férreas Pimentel, *et al.* (2010).

3.3.2.1. Estudos laboratoriais

Segundo Lopes (2009) um dos equipamentos utilizados nos estudos à escala real, que é frequentemente mencionado na bibliografia, é o “Vibrogir” (Figura 7).

Este equipamento tenta simular as cargas resultantes do tráfego ferroviário, por aplicação de uma carga de 20 toneladas a uma travessa de via-férrea a uma frequência de 50Hz.

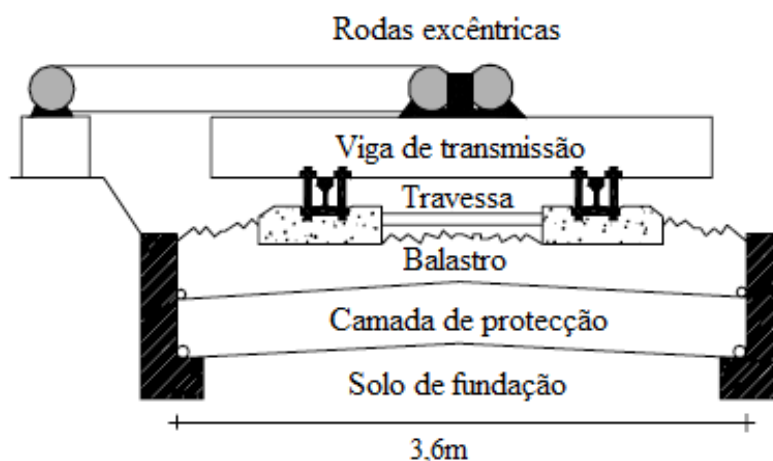


Figura 7. Esquema representativo do equipamento em escala real “Vibrogir” (adaptado de Nancey, *et al.* (2002)).

Estudos de Nancey, *et al.* (2002) realizados no “Vibrogir” usando geotêxteis com especificações, de acordo com as de Raymond (1999) para caminhos-de-ferro Norte Americanos, no contexto dos caminhos-de-ferro Franceses e Europeus, consideraram uma duração de carregamento, que variou entre 20h (em condições secas e saturadas), e 80, 120, e 200h para condições secas. Como principais conclusões deste estudo pode-se referir que [Lopes (2009)]:

- às 20h, para condições saturadas, era visível uma grande quantidade de finos;
- relativamente à permeabilidade normal dos geotêxteis, verificou-se um ligeiro decréscimo, para níveis aceitáveis (Figura 8), não se tendo verificado a ocorrência de colmatção;
- a transmissividade do geotêxtil sofreu um pequeno decréscimo inicial (Figura 9), mantendo-se na restante duração do carregamento com um valor sensivelmente constante.

- a transmissividade do geotêxtil sofreu um pequeno decréscimo inicial (Figura 9), mantendo-se na restante duração do carregamento com um valor sensivelmente constante.

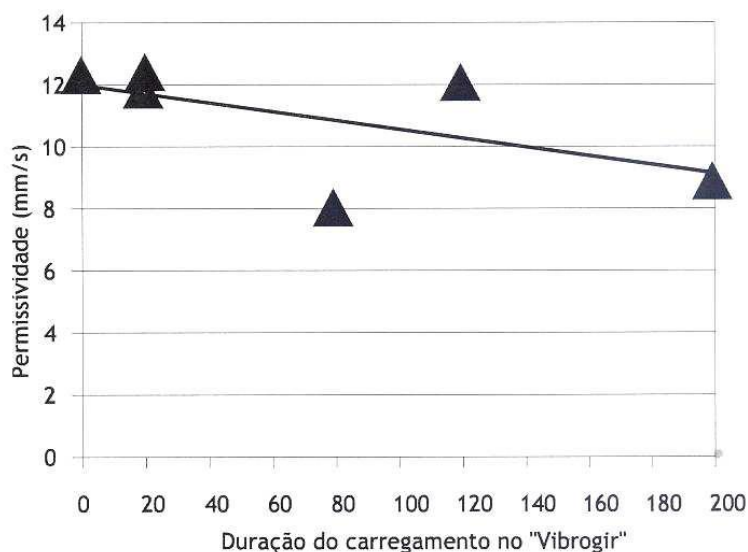


Figura 8. Evolução da permeabilidade normal com a duração do carregamento no “Vibroir” (adaptado de Nancey, *et al.* (2002)).

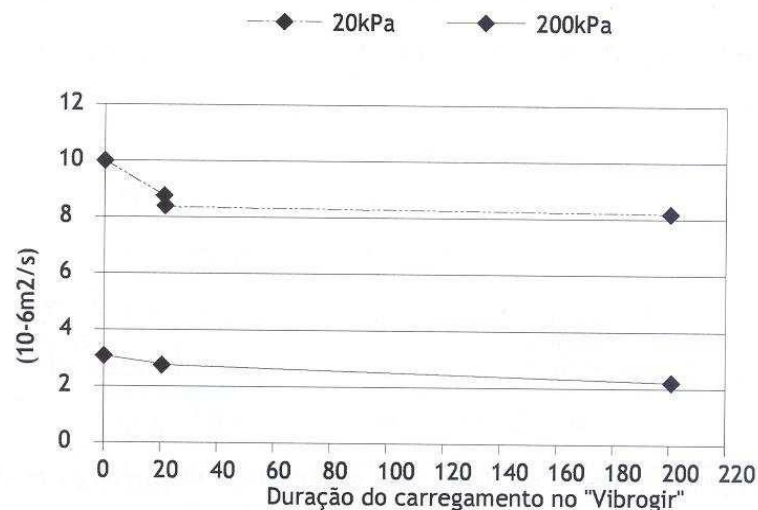


Figura 9. Evolução da transmissividade (adaptado de Nancey *et al.*, 2002),).

3.3.3. Reforço

Para a função de reforço podem-se utilizar, de acordo com as particularidades exigíveis, geotêxteis, geogrelhas, geocélulas e geocompósitos de reforço.

De acordo com Pimentel, *et al.* (2010) estes materiais, quando instalados sobre subleitos instáveis, podem eliminar a necessidade de substituição desse solo, aumentando a

capacidade de suporte de carga do sistema devido à distribuição de tensões. Quando instalados dentro das camadas de balastro, ou sub-blastro, podem contribuir para reduzir os assentamentos associados ao espalhamento lateral destes materiais. As principais características a considerar para esta função devem ser a interacção entre geossintético, solo e balastro, a resistência a danos mecânicos, o módulo de elasticidade e a resistência à tracção.

3.4.Danificação de geossintéticos

3.4.1. Abrasão

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010) por definição, a abrasão é um processo mecânico de desgaste de um material devido às forças que se geram entre superfícies por meio de fricção. Esta problemática aplicada aos geossintéticos traduz-se pelo toque de um geossintético com um material abrasivo, ou quando existe, como no caso das vias-férreas, acções repetitivas que originam movimentos relativos entre os geossintéticos e os solos em contacto com estes. A abrasão pode ocorrer em todos os tipos de geossintéticos, com especial intensidade em geotêxteis não tecidos agulhados, já que a sua superfície é especialmente sensível a sofrer abrasão. Importa, ainda, salientar que a abrasão devido ao contacto com material de aterro de pequenas dimensões pode ser muito significativa, actuando mais para este mecanismo a angulosidade que as partículas têm, que a sua dimensão. De facto, a observação visual de geossintéticos após o espalhamento e a compactação do material de aterro, e a circulação dos equipamentos de construção que lhes está associada demonstra as sequelas produzidas sobre estes materiais.

As principais consequências da abrasão são a redução de espessura, que pode ter como consequência uma diminuição local da resistência do geossintético, e a alteração das propriedades hidráulicas do material, nomeadamente enquanto filtro. Sempre que a abrasão é muito significativa pode mesmo haver destruição total de uma determinada área do geossintético [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Alguns estudos laboratoriais desenvolvidos por Van Dine, *et al.* (1982) a abordar este tema da abrasão em geotêxteis, verificam quais os principais processos de abrasão que afectam a aplicação destes materiais em obra. Estes autores seleccionaram geotêxteis tecidos e não tecidos, com massa por unidade de área compreendidos entre 137 e 730

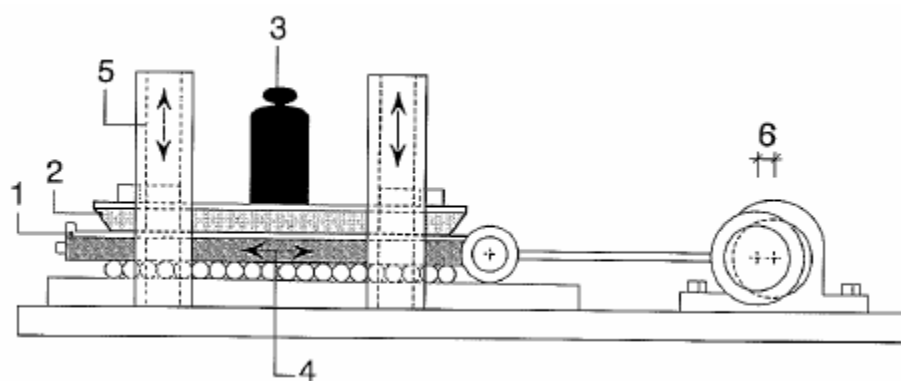
g/m^2 , e apuraram que os principais processos de abrasão ocorridos, em relação aos tecidos foram a degradação superficial, a separação e corte. Para os não tecidos foram verificados a desagregação superficial, o achatamento e o corte. Na Tabela 1 faz-se referência aos processos de abrasão observados por inspecção visual e ao microscópio por Van Dine, *et al.* (1982).

Tabela 1. Descrição dos processos de abrasão (adaptado de Van Dine *et al.*, 1982 por Pinto (2005)).

Processo de abrasão	Descrição do fenómeno
Alinhamento	Filamentos de geotêxteis, previamente não alinhados, tendem a ficar alinhados numa direcção preferencial.
Nódulos	Filamentos individuais são parcialmente desagregados da estrutura, formando pequenos nódulos.
Corte	Filamentos individuais são primeiramente quebrados e depois cortados na direcção transversal do filamento.
Achatamento	A espessura de filamentos individuais é reduzida, enquanto a sua largura é aumentada, produzindo achatamento.
Desagregação superficial	Os filamentos superficiais são total, ou parcialmente, desagregados da estrutura que compõe o geotêxtil.
Perfuração	Filamentos individuais sofrem desgaste por vários processos, desenvolvendo-se uma abertura no geotêxtil.
Separação	Filamentos individuais separam-se da estrutura. Limitado a geotêxteis não tecidos.

A simulação da abrasão em geotêxteis em aplicações ferroviárias faz-se de acordo com a Norma Europeia NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)) (Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante)), adaptada da ASTM 4886, por meio de equipamento especializado, representado na Figura 10.

Este mecanismo simula a abrasão ao provocar o deslocamento relativo entre uma película abrasiva (parte móvel) e o geotêxtil (parte fixa).



Legenda:

- 1 – Bloco deslizante
- 2 – Provete de geotêxtil (50mm × 300mm) ±1mm
- 3 – Massa total (6±0,01) kg
- 4 – Movimento linear (25±1) mm
- 5 – Guia vertical
- 6 – Excentricidade 12,5 mm

Figura 10. Equipamento para simulação da abrasão sofrida pelos geossintéticos em aplicações ferroviárias [NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)]].

3.4.2. Danificação durante a instalação

3.4.2.1. Introdução

A danificação durante a instalação, ou de forma abreviada DDI, é um conceito que relaciona as operações de colocação, compactação e manuseamento de material de aterro junto aos geossintéticos e os efeitos que daí resultam, nomeadamente, falhas locais e alterações das propriedades mecânicas e hidráulicas.

Os exemplos práticos, mais visíveis da danificação de geossintéticos, englobam os trabalhos de remoção do solo, preparação de superfícies, espalhamento e compactação do material confinante e circulação de veículos e cargas. Todos estes factores revelam escassa sensibilidade ou prevenção para os possíveis efeitos de danificação mecânica que podem estar a ser aplicados aos geossintéticos.

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010) estas danificações manifestam-se por perfurações e cortes que prejudicam gravemente as propriedades hidráulicas dos geossintéticos, já que aumentam a dimensão característica da abertura dos poros do geossintético, e as propriedades mecânicas, visto que causam pontos de descontinuidade

e fragilidade no geossintético. Dependendo da função que o geossintético esteja a desempenhar, a consequência da sua danificação e alteração das propriedades pode ser mais ou menos condicionante ao seu desempenho.

O equipamento laboratorial actualmente utilizado para simulação da DDI a nível internacional é descrito na ISO/FDIS 10722: 2007(E)) (Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material).

O equipamento laboratorial descrito na ISO/FDIS 10722: 2007(E)) consiste numa caixa metálica onde são depositadas duas camadas de material granular com 75mm de espessura cada. Estas duas camadas são separadas pelo geossintético que se pretende submeter à DDI. A DDI é simulada pela aplicação de 200 ciclos, com frequência de 1Hz, de uma carga vertical a uma placa, transmitindo esta, pressões que variam de 5 a 500kPa ao material granular. O material granular deve ser sintético, em óxido de alumínio, com dimensões compreendidas entre os 5 e os 10 mm Pinho-Lopes e Lopes (2010).

3.4.2.2. Influência da DDI nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos

O estudo laboratorial apresentado no 9º congresso internacional de geossintéticos por Pinho-Lopes e Lopes (2010) avaliou de que forma a danificação durante a instalação pode afectar as propriedades hidráulicas de alguns geotêxteis. Seguindo a norma ENV ISO 10722-1:1997 induziram o efeito da DDI e estabeleceram um programa de testes para dois geotêxteis não tecidos de polipropileno, de filamentos contínuos e mecanicamente ligados designados por GTX1 e GTX2. As características desses materiais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos geotêxteis estudados (adapatdo de Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

Geossintético	Matéria-prima	Massa Por Unidade de Área (g/m ²)	Resistência à Tracção (KN/m)	Resistência ao Punção (KN)
		(EN ISO 9864)	(EN ISO 10319)	(EN ISO 12236)
GTX1	PP	200	15	2,35
GTX2	PP	700	42	7,2

O programa de testes incidiu na realização de ensaios para determinação da dimensão característica das aberturas e da permeabilidade no plano de acordo dos geotêxteis com as normas EN ISO 12956 (1999) e EN ISO 12958 (1999), respectivamente.

A análise visual dos efeitos da DDI revelou que as amostras GTX1 e GTX2 sofreram danificação apresentando sinais de abrasão, furos e cortes mas com especial incidência na amostra GTX1, o que vai de encontro à tendência esperada devido à diferença na massa por unidade de área destes geotêxteis.

A dimensão característica das aberturas obtida por efeito da DDI, Tabela 3, revela um aumento muito significativo desta propriedade para o geotêxtil GTX1, de 95%, o que num contexto prático comprometeria a sua utilização enquanto filtro. A dimensão característica das aberturas da amostra GTX2 também aumentou, contudo neste caso com um aumento pequeno, quando comparado com GTX1, de 14%.

Tabela 3. Dimensão característica das aberturas (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

Geossintético	O ₉₀ (μm)	
	Intacto	Após DDI
GTX1	115,7	225,6
GTX2	137,1	156,2

O resultado da avaliação da permeabilidade no plano dos dois geotêxteis está apresentada nas Tabelas 4 e 5 na direcção de fabrico e perpendicular à de fabrico, respectivamente. Nestes quadros os valores referem-se a tensões de confinamento de 20, 100 e 200 kPa e a um gradiente hidráulico de 0,1 e 1,0.

Tabela 4. Permeabilidade no plano dos geotêxteis na direcção de fabrico (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes 2010).

Geossintético	Permeabilidade (l/m/s)	Intacto	Após DDI
GTX1	q _{20/0,1}	1,80E-07	2,02E-07
	q _{20/1,0}	1,80E-06	2,22E-06
	q _{100/0,1}	4,16E-08	4,16E-08
	q _{100/1,0}	3,86E-07	4,92E-07
	q _{200/0,1}	3,17E-08	2,94E-08
	q _{200/1,0}	2,98E-07	2,75E-07
GTX2	q _{20/0,1}	9,12E-07	6,88E-07
	q _{20/1,0}	8,94E-06	6,50E-06
	q _{100/0,1}	2,05E-07	1,98E-07
	q _{100/1,0}	1,84E-06	1,76E-06
	q _{200/0,1}	1,20E-07	1,05E-07
	q _{200/1,0}	9,91E-07	9,30E-07

Tabela 5. Permeabilidade no plano dos geotêxteis na direcção perpendicular à de fabrico (adaptado de Pinho-Lopes e Lopes 2010).

Geossintético	Permeabilidade (l/m/s)	Intacto	Após DDI
GTX1	q _{20/0,1}	2,38E-07	2,11E-07
	q _{20/1,0}	2,32E-06	2,21E-06
	q _{100/0,1}	8,32E-08	6,32E-08
	q _{100/1,0}	7,41E-07	6,27E-07
	q _{200/0,1}	5,14E-08	4,06E-08
	q _{200/1,0}	4,65E-07	3,67E-07
GTX2	q _{20/0,1}	1,01E-06	8,60E-07
	q _{20/1,0}	9,57E-06	7,97E-06
	q _{100/0,1}	2,42E-07	1,86E-07
	q _{100/1,0}	2,08E-06	1,75E-06
	q _{200/0,1}	1,30E-07	1,03E-07
	q _{200/1,0}	1,04E-06	8,60E-07

Para as amostras intactas do GTX1 a permeabilidade perpendicular ao plano foi maior do que a permeabilidade na direcção do plano. Depois de sujeito a DDI esta diferença diminuiu consideravelmente, o que levou a concluir que o efeito da DDI não é o mesmo nas duas direcções consideradas.

Para o geotêxtil GTX2 os resultados obtidos para amostras intactas foram semelhantes qualitativamente em relação à amostra GTX1, mas num valor mais baixo.

Neste estudo de Pinho Lopes e Lopes, (2010), à semelhança de outras aplicações de geossintéticos onde as propriedades mais relevantes são as mecânicas, foram determinados factores de redução. Estes representam as mudanças devido ao efeito da DDI sobre as características analisadas, tendo sido obtidos através da Equação 3.1 onde $X_{intacto}$ é o parâmetro correspondente a amostras intactas e $X_{danificado}$ é o valor da propriedade após DDI.

$$CR_{DDI} = \frac{X_{intacto}}{X_{danificado}} \quad (3.1)$$

Como seria de esperar, o factor de redução para a dimensão característica das aberturas dos dois geotêxteis considerados, nomeadamente 0,51 para o GTX1 e 0,88 para o GTX2, traduz os efeitos da DDI sobre os geossintéticos pelo que se verifica um aumento da dimensão das aberturas após o processo de DDI. Para a permeabilidade no plano os factores de redução situaram-se no intervalo entre 1 a 1,38, para a direcção de fabrico, tomando-se por 1 os valores abaixo do mínimo de 1 e entre 1,05 e 1,32, para os ensaios realizados na direcção perpendicular à direcção de fabrico. Neste caso a influência da DDI verifica-se pela diminuição da permeabilidade no plano.

As conclusões deste estudo de Pinho-Lopes e Lopes (2010) permitiram avaliar que o efeito da DDI é muito importante causando cortes, perfurações e abrasão. Como era esperado, os danos causados foram mais severos no geotêxtil com menor massa por unidade de área. Em relação à dimensão característica das aberturas, foi óbvio o aumento do tamanho das aberturas após DDI, sendo sensata a avaliação deste parâmetro, admitindo valores conservativos na fase de projecto.

3.5.Normalização aplicável aos ensaios de geossintéticos

Os geossintéticos são, geralmente, ensaiados pelo fabricante, para controlo da produção, e pelo utilizador, com dois objectivos [Moreira (2009)]:

- Seleccionar um determinado produto para uma dada aplicação (ensaios de qualificação);
- Identificar e controlar a qualidade dos produtos seleccionados (ensaios de recepção, identificação e controlo de qualidade).

Atendendo aos objectivos experimentais deste trabalho a Tabela 6 faz referência às normas imprescindíveis a levar em consideração, e já abordadas anteriormente.

Tabela 6. Normas a ter como referência (adaptado de Moreira (2009)).

Normas de terminologia, identificação e amostragem dos geossintéticos	EN ISO 10318	Geossintéticos. Termos e definições
Normas referentes às exigências para os geossintéticos com vista à marcação CE	NP EN 13250: 2006	Geotêxteis e produtos relacionados – Características requeridas para a utilização na construção de vias-férreas
Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos	EN ISO 10722: 2007	Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material
	NP EN ISO 13427: 2006	Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante)
Normas para ensaios hidráulicos de geossintéticos	NP EN ISO 11058: 2003	Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento
	NP EN ISO 12956: 2006	Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da dimensão característica da abertura
	NP EN ISO 12958: 2005	Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano

4. ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1.Introdução

O desenvolvimento prático deste trabalho traduz-se, no presente capítulo, pelo estudo laboratorial levado a cabo, no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), com a expectativa de simular os fenómenos de danificação durante a instalação e abrasão em dois tipos de geossintéticos. Os ensaios enquadram-se na investigação do efeito que a DDI, a abrasão e o seu efeito conjunto podem ter sobre o comportamento hidráulico dos geossintéticos, especificamente, no que toca à permeabilidade normal e perpendicular ao seu plano bem como à dimensão característica das suas aberturas.

Os ensaios realizados compreenderam os procedimentos descritos nas normas actualmente em vigor:

- NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998);
- EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007).
- NP EN ISO 11058: 2003 – Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento
- NP EN ISO 12956: 2006 – Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da dimensão característica da abertura
- NP EN ISO 12958: 2005 – Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano

4.2.Geossintéticos utilizados no estudo

Os geossintéticos seleccionados para este estudo ajustam-se a aplicações de engenharia ferroviária, particularmente no que se refere à sua utilização em aplicações de curto e longo prazo, desempenhando funções de reforço, na protecção de solos de drenagem e filtração.

Escolheram-se, então, dois materiais com diferente estrutura: um geotêxtil, GTX, e um geocompósito de reforço, GCR (Figura 11).

O primeiro é um geotêxtil não tecido (GTX), mecanicamente ligado, constituído por filamentos de polipropileno (PP) contínuos, com características resistentes aos raios UV e massa por unidade de área de 1000 g/m^2 .

O segundo é um geocompósito unidireccional (GCR) constituído por um geotêxtil não tecido de polipropileno (PP), reforçado por filamentos de poliéster (PET) de elevada resistência.

A resistência mínima à tracção é de 55 KN/m . Na Tabela 7, de acordo com as fichas técnicas dos materiais disponibilizados pelo fabricante, são apresentados os valores da resistência à tracção, da dimensão característica das aberturas, da permeabilidade no plano e normal ao plano, do geotêxtil GTX e do geocompósito GCR. Estes valores têm-se, como essenciais, para controlo e crítica dos resultados obtidos através da campanha de ensaios e aferir acerca do seu rigor.

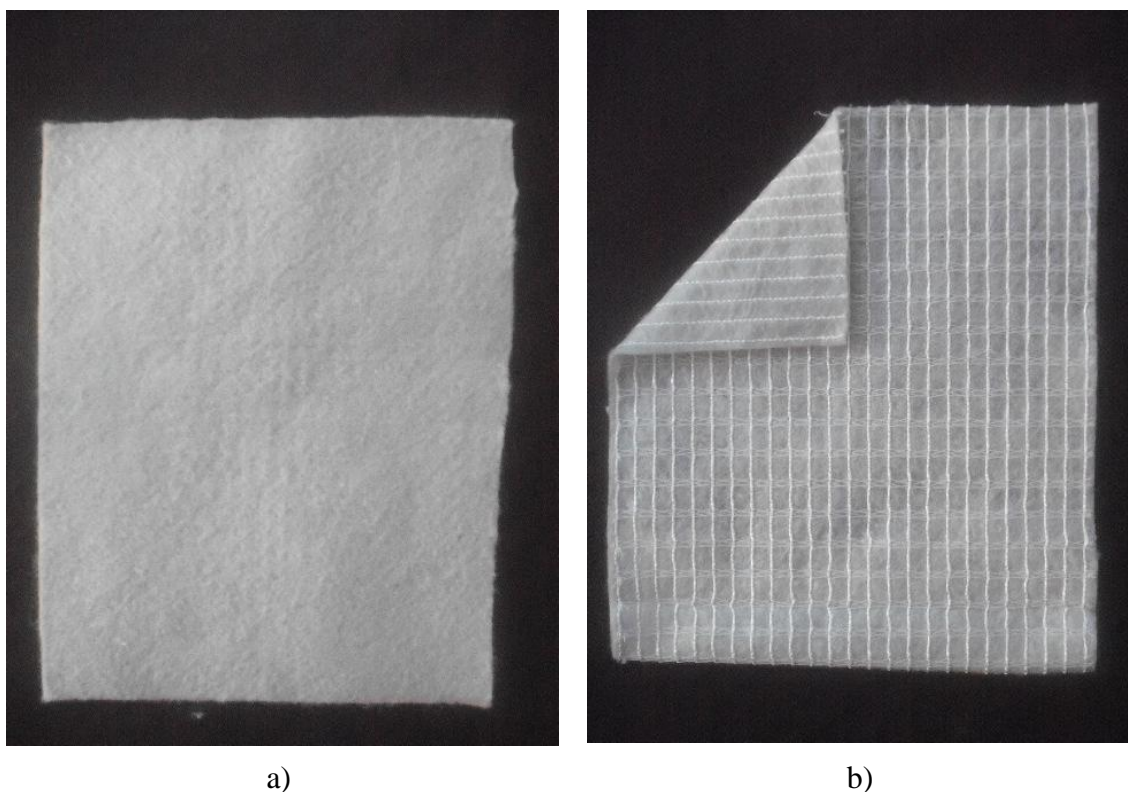


Figura 11. Materiais utilizados no estudo: a) GTX; b) GCR.

Tabela 7. Propriedades nominais dos geossintéticos estudados, na direcção de fabrico.

Propriedade		Unidades	GTX (GTX)	GCR (RP55)
Resistência à Tracção		kN/m	55	58
Dimensão Característica das Aberturas		μm	75	95
Permeabilidade no Plano	20 KPa	m^2/s	$11,0 \times 10^{-6}$	$20,0 \times 10^{-7}$
	100 KPa		$4,1 \times 10^{-6}$	-
Permeabilidade Perpendicular ao Plano ($\Delta h = 50 \text{ mm}$)		$\text{l/m}^2\text{s (mm/s)}$	8	70

4.3. Ensaio Hidráulicos

4.3.1. Introdução

Para este grupo de ensaios definem-se as respectivas referências normativas a respeitar e procede-se a uma descrição das várias etapas a seguir durante a elaboração de ensaios a geotêxteis ou produtos relacionados, particularmente no que concerne à especificação dos métodos de ensaio para determinação da capacidade de escoamento no plano, das características de permeabilidade à água normal ao plano e da dimensão característica da abertura de uma camada simples.

4.3.2. Avaliação da permeabilidade

A permeabilidade, por definição, representa a capacidade de um corpo ser atravessado por gases, luz, fluidos, etc. No contexto particular dos geossintéticos caracteriza a sua capacidade em escoar água ao longo do próprio plano do material e na direcção perpendicular a este, como se pode observar nas Figuras 12 e 13.

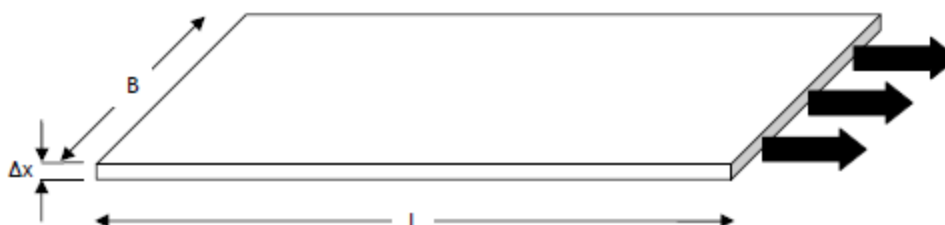


Figura 12. Permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla (2002)).

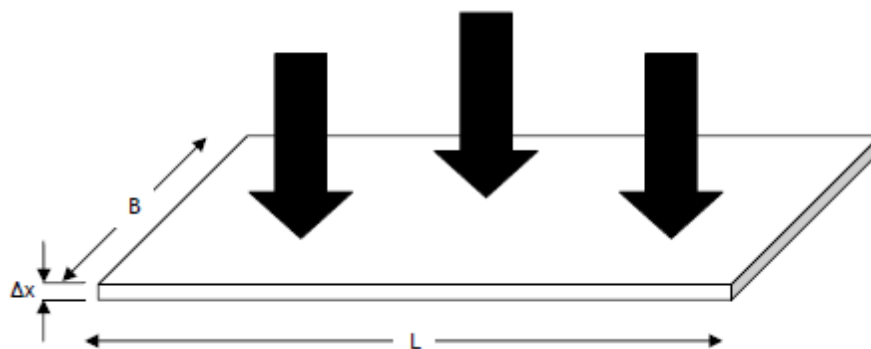


Figura 13. Permeabilidade no plano perpendicular ao do material (adaptado de Shukla (2002)).

Os métodos de ensaio preconizados na normalização concebida para a determinação da permeabilidade dos geotêxteis baseiam-se na equação de Darcy, que traduz as características de um escoamento laminar:

$$v = k \cdot i \quad (4.1)$$

em que v é a velocidade do escoamento (m/s), k é o coeficiente de permeabilidade do material (m/s) e i é o gradiente hidráulico (m/m) [Moreira (2009)].

Segundo Shukla (2002) a vantagem em expressar a permeabilidade de um geossintético de acordo com a equação de Darcy está na facilidade em relacionar a permeabilidade de um geossintético directamente com a permeabilidade do solo. A maior desvantagem prende-se com o facto da lei de Darcy assumir um escoamento laminar, enquanto que os geossintéticos, especialmente os geotêxteis, são caracterizados muitas vezes por exibir escoamentos semi-turbulentos ou turbulentos.

4.3.2.1. Permeabilidade no plano do geossintético

A Norma Europeia, NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) “Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano” (ISO 12958: 1999), especifica o método de ensaio para determinar a capacidade de escoamento no plano de um geotêxtil ou produto relacionado, quando sujeito a carga hidráulica constante.

O escoamento no plano de um geotêxtil ou produto relacionado é medido sob diferentes valores de tensão normal de compressão, gradientes hidráulicos e superfícies de

contacto definidas. Para esse efeito, o laboratório de Geossintéticos da FEUP (LGS), dispõe de um equipamento de ensaio concebido de acordo com os requisitos enumerados na norma e capaz de quantificar o fluxo de água que permeia ao longo do plano de um geossintético. A norma apresenta alguns esquemas típicos de possíveis aparelhos, Figura 14. Na Figura 15 pode-se observar o aspecto geral do equipamento disponível no LGS.

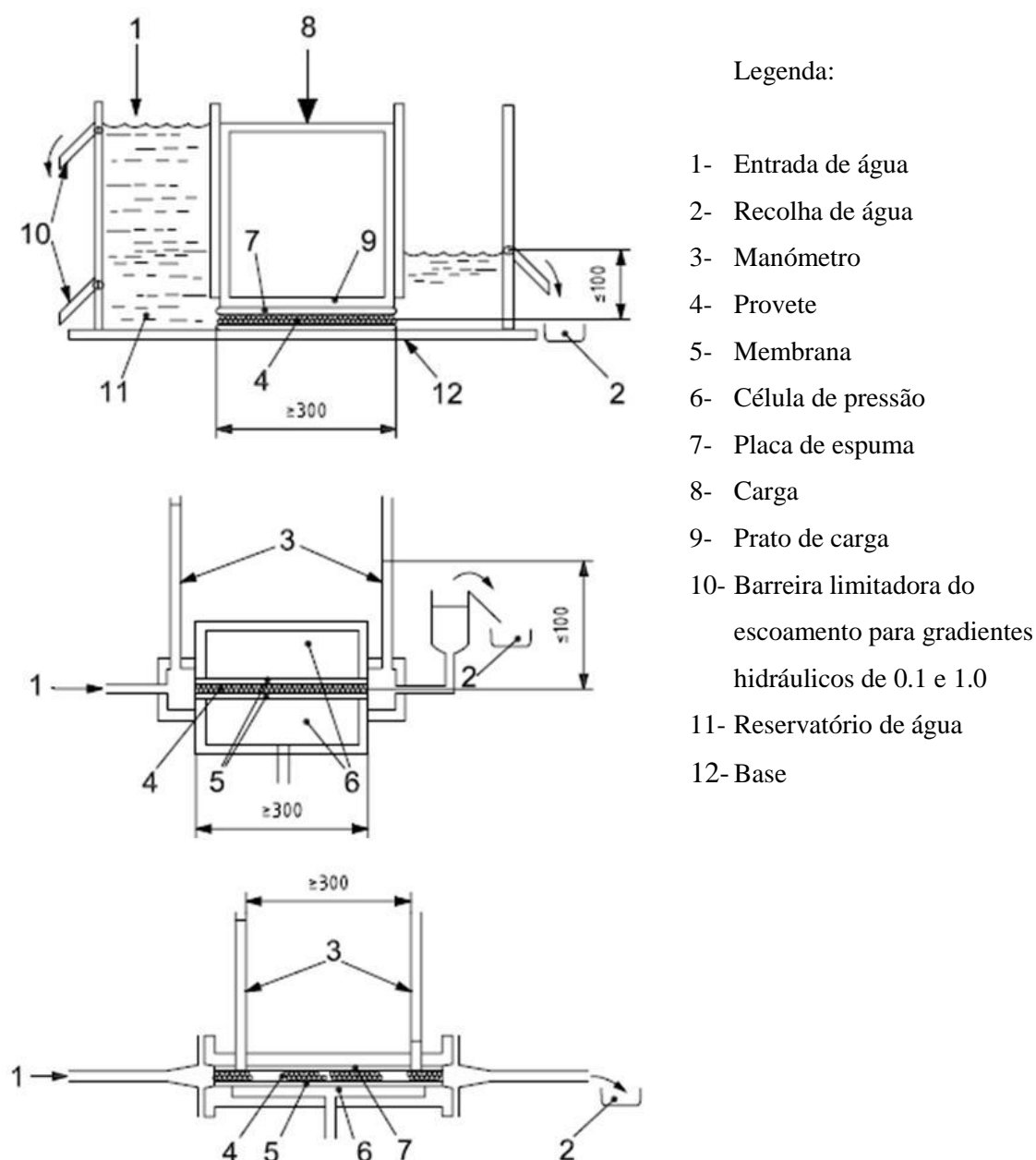


Figura 14. Esquemas típicos de aparelhos [NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)].

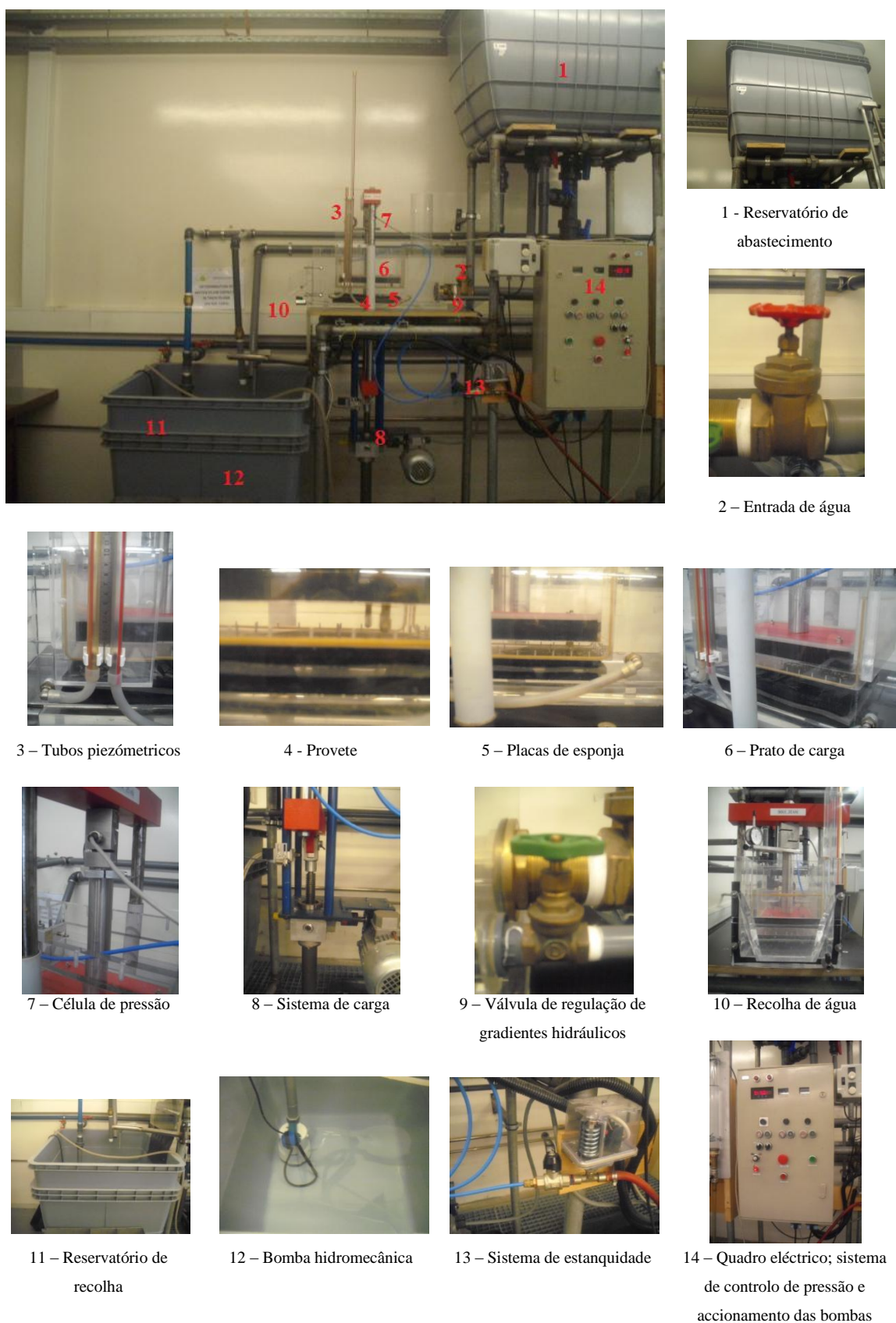


Figura 15. Aparelho disponível no LGS da FEUP para ensaiar a permeabilidade no plano do geossintético.

Atendendo à prática laboratorial, a obtenção da permeabilidade no plano de um geossintético implica a medição do volume de água que escoar num determinado período de tempo, longitudinalmente, através do núcleo de um provete para uma dada pressão de fixação e para um determinado valor de gradiente hidráulico. As dimensões do provete, de acordo com a norma NP EN ISO 12958: 2005, devem apresentar 0,20 m de largura e 0,30 m de comprimento. Os valores a aplicar de tensão normal de compressão devem situar-se nos 20 kPa, 100 kPa e 200 kPa e os valores para o gradiente hidráulico em 0,1 mm/mm e 1,0 mm/mm.

A realização do ensaio compreende a aplicação, de forma crescente, de sucessivas tensões de compressão sobre o geossintético a estudar, por forma, a que para cada pressão de confinamento se estabeleça um fluxo de água associado a cada um dos valores dos gradientes hidráulicos, 0,1 mm/mm e 1,0 mm/mm. Assim sendo, para cada provete, para cada valor de tensão de compressão e para cada valor de gradiente hidráulico, quantifica-se o volume de água que é possível recolher num determinado período de tempo. De acordo com estes princípios, a capacidade de escoamento no plano por unidade de área para uma determinada tensão e gradiente traduz-se pela obtenção do coeficiente hidráulico, $q_{\text{pressão/gradiente}}$ (m^2/s), calculado de acordo com a expressão 4.2:

$$q_{\text{pressão/gradiente}} = \frac{VR_T}{Wt} \quad (4.2)$$

onde:

$q_{\text{tensão/gradiente}}$ - é a capacidade de escoamento no plano por unidade de área para uma determinada tensão e gradiente (m^2s^{-1})

V - média do volume de água recolhido (m^3)

R_T - factor de correcção para a temperatura da água de 20 °C,

W - largura do provete (m)

t - tempo (s)

Os resultados podem ser indicados num gráfico onde se represente a capacidade de escoamento *versus* tensão normal para os dois gradientes utilizados, Figura 16. Os dados obtidos podem ser tratados e representados graficamente da maneira mais

adequada, considerando que o tipo de análise a efectuar incide sobre valores isoladamente ou sobre a sua média.

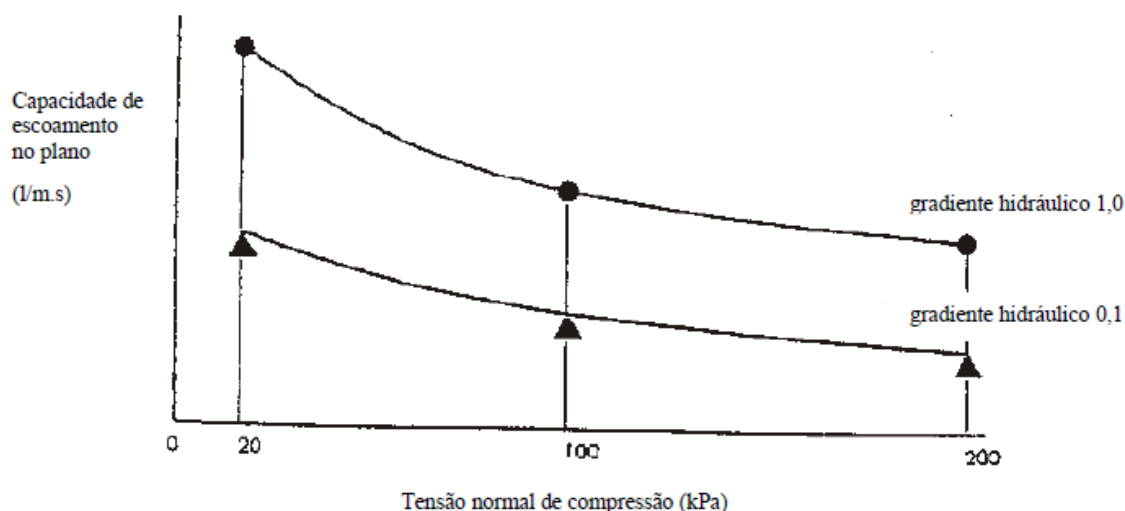


Figura 16. Exemplos de curvas de coeficiente hidráulico versus tensão normal de compressão [NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)]

Na avaliação da capacidade de escoamento no plano é ainda usual a utilização, de acordo com a norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) do termo transmissividade que se refere às condições de escoamento em regime laminar, o que equivale à capacidade de escoamento para um gradiente hidráulico unitário. Uma vez que pode ocorrer escoamento não laminar, a referida norma indica a utilização do termo capacidade de escoamento. Ainda assim, o termo transmissividade é o mais utilizado, no que toca a definir como característica ou propriedade dos geotêxteis e dos geocompósitos drenantes, a sua capacidade de escoar um determinado caudal de água por largura do geossintético, para um gradiente hidráulico unitário e sob um fluxo de escoamento laminar no interior do plano do geossintético. A transmissividade, θ (m^2/s), é obtida, de acordo com a expressão (4.3), pela divisão do valor de $q_{\text{pressão/gradiente}}$ pelo valor do gradiente hidráulico, i (mm/mm). Entende-se por gradiente hidráulico, segundo a norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) a razão entre a perda de carga de um geotêxtil ou produto relacionado e a distância entre os respectivos pontos de medição, ou seja, o comprimento percorrido na direcção do fluxo.

$$\theta = \frac{q_{\text{pressão/gradiente}}}{i} \quad (4.3)$$

Segundo Ingold (1994) nos ensaios que visam a determinação das características hidráulicas, os materiais ficam sujeitos a diversos níveis de pressão, quer pela aplicação mecânica de forças, quer pela pressão da própria coluna de água. Uma vez que os geotêxteis, principalmente os geotêxteis não tecidos, apresentam uma certa flexibilidade e compressibilidade, é natural que se tornem mais ou menos compactos e mais ou menos espessos durante as diferentes fases dos ensaios laboratoriais.

Considera-se então que a transmissividade enquanto propriedade do material é especialmente importante por ser uma grandeza que despreza a espessura do material.

Ainda assim, para se conhecer o coeficiente de permeabilidade no plano do material, a quantificação da espessura é indispensável. Este índice estabelece um dos parâmetros de caracterização do material, pelo que é um valor representativo da velocidade com que a água atravessa uma amostra de um geossintético. O valor deste coeficiente, k_p (m/s), pode ser obtido dividindo o valor da transmissividade, θ , pela espessura do provete, Δx (m), conforme a expressão 4.4:

$$k_p = \frac{\theta}{\Delta x} \quad (4.4)$$

Considerando que o coeficiente hidráulico, a transmissividade e o coeficiente de permeabilidade são parâmetros fundamentais à avaliação da permeabilidade no plano e à caracterização dos geossintéticos é relevante entender as deduções matemáticas que relacionam estes índices e de que forma podem ser obtidos. Por questões de simplicidade despreza-se o efeito que a temperatura tem sobre a viscosidade da água e o factor correctivo associado, R_T , pelo que se considera:

$$q_{\text{pressão/gradiente}} = \frac{V}{Wt} \quad (4.5)$$

Sabendo que:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.6)$$

em que Q é o caudal (m^3/s), V o volume (m^3), e t é o tempo (s), vem que:

$$q_{\text{pressão/gradiente}} = \frac{Q}{W} \quad (4.7)$$

No escoamento da água ao longo do plano dos geossintéticos, de acordo com a lei Darcy, e multiplicando ambos os membros da equação 4.1 pela secção, ou área, tem-se:

$$Q = k i S \quad (4.8)$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade do material (m/s), i o gradiente hidráulico e S a área do escoamento do fluido (m²). Considerando Δh como a perda de carga verificada no escoamento (m) e L o comprimento do provete (m), substitui-se na expressão 4.8 resulta:

$$Q = k_p \frac{\Delta h}{L} S \quad (4.9)$$

Tomando a área de escoamento do fluido por:

$$S = \Delta x W \quad (4.10)$$

A expressão 4.9 vem:

$$Q = k_p \frac{\Delta h}{L} \Delta x W \quad (4.11)$$

$$\frac{Q}{W} = k_p \frac{\Delta h}{L} \Delta x \quad (4.12)$$

$$\frac{Q}{W} = k_p i \Delta x \quad (4.13)$$

A transmissividade hidráulica, θ , definida como o produto do coeficiente de permeabilidade do material, k_p , pela espessura do mesmo, Δx , vem que:

$$\frac{Q}{W} = \theta i \quad (4.14)$$

$$\theta = \frac{Q}{W i} \quad (4.15)$$

Sabendo que o caudal é dado pela expressão 4.6, e atendendo à relação de θ com $q_{\text{pressão/gradiente}}$ através da expressão 4.3, obtém-se:

$$q_{\text{pressão/gradiente}} = \frac{V}{W t} \quad (4.16)$$

Em relação a este ensaio importa ainda descrever o equipamento do LGS, as etapas seguidas e os cuidados levados em linha de conta durante a realização dos ensaios.

O equipamento de ensaio, Figura 15, é constituído por dois depósitos a diferentes níveis, ligados entre si por meio de tubagens. O reservatório inferior serve para recolha da água que escoar através do provete, enquanto o reservatório superior funciona como fonte de alimentação de água. Através deste sistema consegue-se criar um circuito, em que o fluxo de água faz-se ascensionalmente de forma mecânica, através de uma bomba localizada no fundo do tanque inferior, e desce percolando através do provete por efeito da gravidade.

Anexo a este sistema existe um mecanismo de carga impulsionado, mecanicamente, por um motor eléctrico e pela rotação que produz sobre um eixo sem fim que mantém os provetes sob tensões normais de compressão constantes. A transferência da pressão faz-se através de um prato de carga, de área $0,2 \times 0,3 \text{ m}^2$ na direcção do escoamento, associado a um sensor ou célula de carga que permite o controlo da tensão exercida.

Para o controlo do gradiente hidráulico o equipamento apresenta dois tubos piezométricos e uma régua graduada para leitura do nível da água, pelo que estão ligados a montante, junto ao tubo de fornecimento, e a jusante na zona de descarga. Através destes consegue-se, tal como a norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) indica, manter uma perda de carga constante para diferentes níveis de água, pelo menos os correspondentes ao gradiente hidráulico de 0,1 e 1,0, enquanto se mantém, no ponto de descarga, uma carga hidráulica que não ultrapasse os 100 mm. A regulação da perda de carga é feita pela abertura ou fecho de duas válvulas, uma de entrada e outra de saída de

água, que se encontram junto ao tubo de fornecimento e que permite equilibrar e manter o fluxo de água no valor de gradiente hidráulico pretendido.

A norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) refere ainda que o equipamento deve ser essencialmente estanque, sendo que quando a placa ou membrana de pressão estiver a aplicar a menor tensão normal de compressão, sem o provete colocado, e estiver instalado o gradiente hidráulico mais elevado, a fuga não deve exceder 0,2 ml/s. Para este efeito, o prato de carga do equipamento contém uma ranhura em todo o seu perímetro, onde está colocada uma membrana de borracha, ligada a um compressor, cujas funções são as de impedir que haja percolação da água entre o prato de carga e as paredes laterais do equipamento, e precaver a inundação da zona superior do prato de carga [Silva (2010)].

Os preparativos para a realização do ensaio começam com a preparação dos provetes, atendendo às especificações da norma NP EN ISO 9862: 2007 (Ed. 1)) em que se recolhem amostras com medidas de 0,3 m na direcção do escoamento e 0,2 m na direcção perpendicular a esta. Na Figura 17 estão ilustradas duas amostras tipo com as referidas dimensões, provetes do geotêxtil GTX e do geocompósito GCR respectivamente.

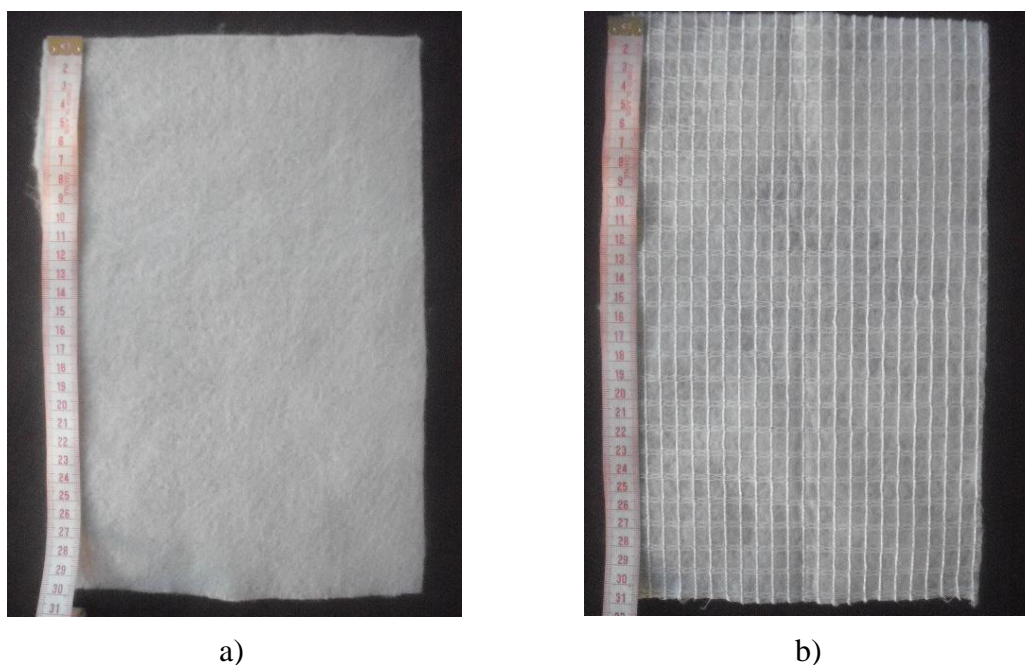


Figura 17. Exemplo de provetes, de dimensões $0,2 \times 0,3 \text{ m}^2$, para ensaio de permeabilidade no plano do material: a) geotêxtil GTX; b) geocompósito GCR.

A norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) estabelece que é necessário ensaiar três amostras com o comprimento na direcção de fabrico do produto, e outras três com o comprimento na direcção perpendicular à direcção de fabrico. Neste trabalho ensaiaram-se apenas provetes com o comprimento segundo a direcção de fabrico.

O procedimento da referida norma prevê ainda que os provetes sejam imersos em água por um período não inferior a doze horas para garantir a completa saturação e a remoção de bolhas de ar das amostras. Para provetes com espessura até 10 mm, a norma prevê também, que deve ser colocada em cada uma das faces uma placa de espuma de borracha com uma espessura nominal de 10 mm. Adoptou-se tanto para os provetes do geotêxtil GTX como para os provetes do geocompósito GCR, já que estes apresentam espessuras inferiores a 10 mm, duas placas de *neoprene* com espessura nominal de 10 mm.

Durante a colocação das placas de espuma e do provete, é importante, assegurar que estes se encontram alinhados com o prato de carga, verificar o seu posicionamento relativo pois as extremidades devem coincidir de forma a evitar a obstrução da entrada ou da saída de água durante o processo de vazão pelo provete. E ainda, garantir um contacto uniforme entre as placas de espuma, o provete e as paredes laterais do equipamento minimizando o risco de se criar caminhos de escoamento preferencial pelos bordos do provete.

Neste ensaio são utilizados três valores de tensão, 20 kPa, 100 kPa e 200 kPa e para cada uma das tensões é recolhida a água que passa no sistema, durante um determinado tempo para dois valores de gradiente hidráulico: 0,1 mm/mm e, depois, 1,0 mm/mm. O volume de água recolhido deve ser no mínimo 0,5 l, com um tempo de recolha mínimo de 5 segundos e limitado a um máximo de 600 segundos.

Exemplificando, para a tensão de compressão de 20 kPa é anotado o volume de água recolhida para três leituras sob um gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm e outras três leituras para um gradiente hidráulico de 1,0 mm/mm. O mesmo para as restantes tensões de compressão, terminando num total de dezoito leituras por cada provete ensaiado.

Em relação aos ensaios efectuados, o limite das leituras foi o tempo de recolha que se fixou maioritariamente nos 600 segundos tanto para o geotêxtil GTX como para o geocompósito GCR, com algumas excepções em que se verificou a recolha de 0,5 l de água antes de se atingir o limite de 600 segundos.

A aplicação das tensões de compressão sobre os geossintéticos é controlada através do quadro eléctrico visível na Figura 15. É de referir que este equipamento, após ser regulado para uma determinada tensão, apresentava uma diminuição desta com o tempo, pelo que existe a necessidade constante de repor os níveis de tensão de compressão originais e dar novamente início à contagem do tempo. Este facto pode ser explicado pela adaptação do provete e das placas de espuma à tensão exercida. Em geral, este fenómeno estabilizava ao fim de alguns minutos, mediante a tensão exercida.

A par do controlo da tensão é medido, em simultâneo para cada valor de tensão e respectivo gradiente hidráulico, o valor da espessura do conjunto provete com as placas de espuma, utilizando-se para esse efeito o medidor de espessura anexo ao prato de carga, visível na Figura 18.



Figura 18. Medidor de espessura anexo ao prato de carga.

Em relação ao procedimento descrito na norma NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1)) e à conduta seguida na elaboração dos ensaios referentes a este trabalho, passa-se a descrever abaixo os procedimentos laboratoriais seguidos.

O ensaio tem início com a colocação das placas de espuma e do provete e a aplicação de uma tensão de 2 kPa. Seguidamente procede-se ao enchimento do reservatório de entrada com água de modo a que se produza um escoamento que percorra o provete e remova o ar. Assegurada a inexistência de caminhos preferenciais de percolação, ajusta-se a tensão aplicada ao provete no valor de 20 kPa e mantém-se durante 360 segundos. Após este período verifica-se a necessidade de reajustamento da tensão de compressão e enche-se o reservatório de entrada até ao nível correspondente ao gradiente hidráulico de 0,1, ou seja, até o nível da água do reservatório a montante atingir uma cota de 4 cm na régua graduada fixa aos tubos piezométricos. Mantém-se o

escoamento através do provete durante 120 segundos sob as condições descritas. Finalmente recolhe-se a água que passa no sistema durante um determinado período de tempo, tal como já foi mencionado anteriormente com um volume mínimo 0,5 l, com um tempo de recolha mínimo de 5 segundos e limitado a um máximo de 600 segundos. Simultaneamente é anotada a temperatura da água com uma precisão de 0,2 °C e a espessura registada no medidor com uma precisão de 0,01 mm. A massa de água é determinada por pesagem com uma precisão de 1%.

Para este valor de gradiente hidráulico realizam-se mais duas medições, completando um total de três leituras e obtendo-se com isso um valor médio para a massa de água recolhida para uma tensão de compressão de 20 kPa e um gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm.

Para o gradiente hidráulico de 1,0 mm/mm são realizadas mais três leituras seguindo o processo descrito, alterando-se apenas o valor do gradiente hidráulico, agora com uma cota de referência de 31 cm.

Logo que efectuadas as seis leituras para a tensão de 20 kPa, é aberta a válvula de fundo do reservatório de montante e reajusta-se o valor de gradiente hidráulico para 0,1 mm/mm.

Para as tensões de compressão de 100 kPa e 200 kPa repete-se integralmente o procedimento descrito atrás para o valor de tensão de 20 kPa.

Este processo é repetido para todos os provetes do geossintético em estudo e permite, com o tratamento dos dados obtidos, determinar o coeficiente hidráulico do geossintético e aferir conclusões acerca dos valores alcançados.

4.3.2.2. Permeabilidade normal ao plano do geossintético

O processo de determinação da permeabilidade na direcção normal ao plano dos geossintéticos é descrito e regulamentado na norma NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento” (ISO 12958: 1999). A presente norma especifica dois métodos de ensaio, quando este é constituído por apenas uma camada, nomeadamente o método de carga constante e o método de carga variável. A norma NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) apresenta em anexo alguns exemplos de aparelhos para o método de carga hidráulica constante, como se pode verificar na Figura 19, sendo que o aparelho vertical é aquele que mais se aproxima do equipamento disponível no LGS.

No LGS da FEUP está disponível um equipamento, Figura 20, que permite seguir o método de carga constante e submeter um geotêxtil ou produto relacionado, constituído por apenas uma camada, a um fluxo unidireccional de água, normal ao seu plano, sob uma serie de cargas hidráulicas constantes. Este foi o método seguido para a avaliação das características de permeabilidade dos geossintéticos propostos para estudo neste trabalho.

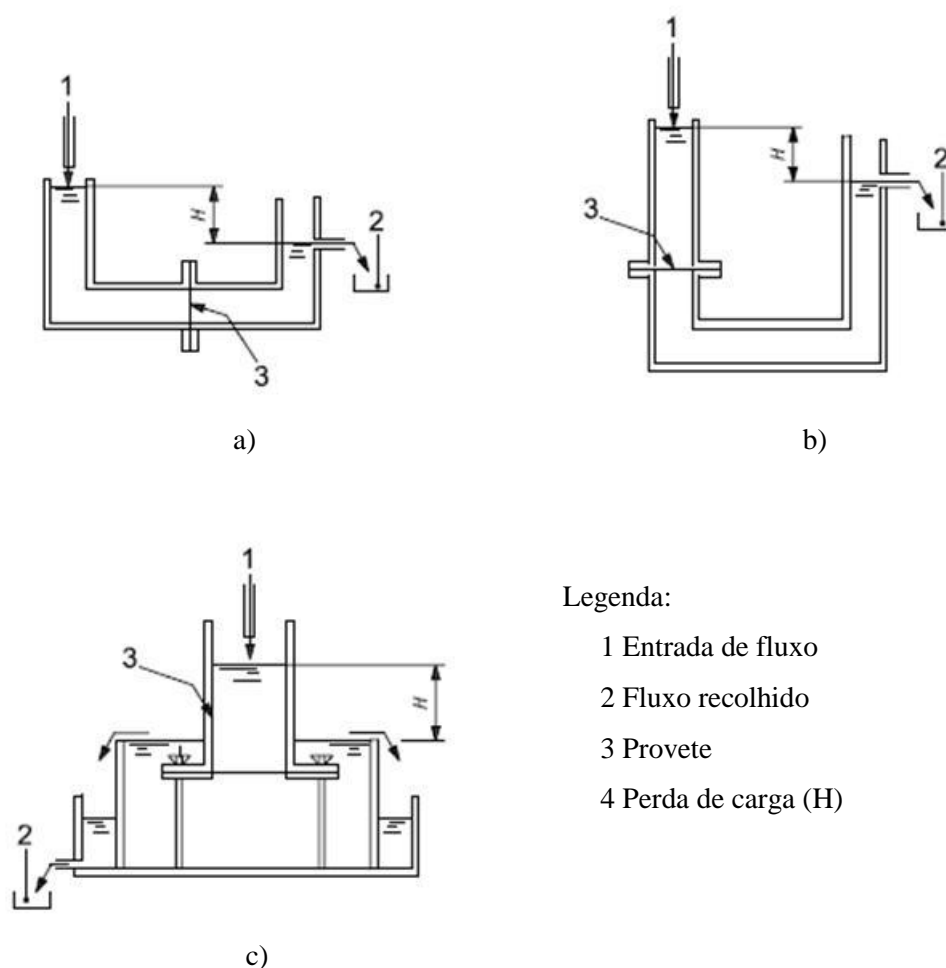


Figura 19. Exemplos de aparelhos para o método de carga hidráulica constante (NP EN ISO 11058: 2003): a) horizontal; b) vertical; c) aberto.

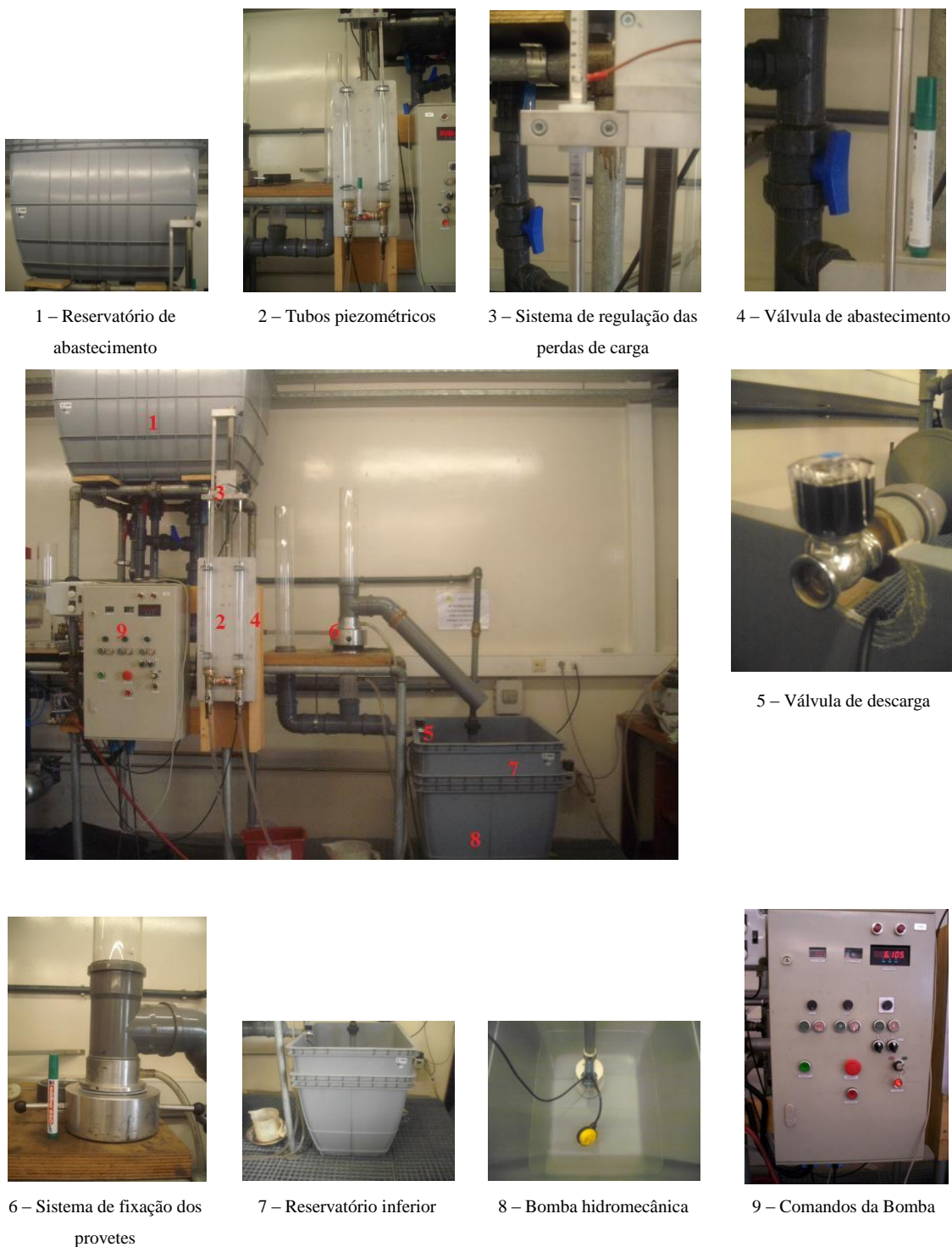


Figura 20. Aparelho disponível no LGS da FEUP para ensaiar a permeabilidade normal ao plano do geossintético.

Para determinar a permeabilidade normal ao plano de um geossintético, os provetes do material são atravessados por vários fluxos de água relativos a valores de perdas de carga conhecidos. A água que transpõe o geossintético é recolhida num dado intervalo de tempo contabilizando-se dois parâmetros: o volume de água recolhida e o tempo de

escoamento, para os valores de perdas de carga de 70 mm, 56 mm, 42 mm, 28 mm e 14 mm. Assim, para cada provete do geossintético e para cada valor de perda de carga, avalia-se o escoamento pela medição, num dado intervalo de tempo, do volume de água passada. Através dos valores obtidos, e de acordo com a norma NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) calcula-se a velocidade de escoamento, V_{20} (m s^{-1}) para a temperatura de 20 °C, usando-se a seguinte equação:

$$V_{20} = \frac{VR_T}{At} \quad (4.17)$$

onde:

V – é o volume de água recolhido (m^3)

R_T - factor de correcção para a temperatura da água de 20 °C,

A – área exposta do provete (m^2)

t – é o tempo medido para atingir o volume V (s)

A obtenção de todos os valores de V_{20} para cada um dos valores de perda de carga permite relacioná-los graficamente através de um diagrama como o representado na Figura 21, e os resultados podem ser apresentados individualmente ou considerando-se a média de um conjunto de resultados obtidos.

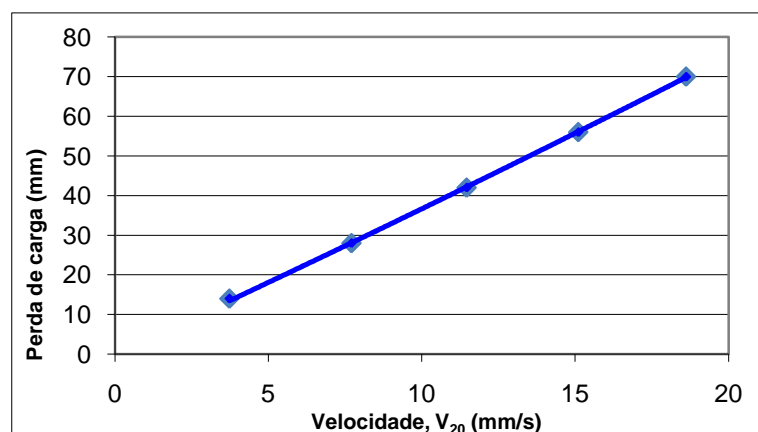


Figura 21. Exemplo de representação gráfica da perda de carga em função da velocidade, V_{20} .

A partir da apresentação das curvas quadráticas que melhor se ajustam aos valores que relacionam graficamente a perda de carga H em função da velocidade V_{20} , para cada

provete, determina-se matematicamente ou por interpretação gráfica, o valor da velocidade de escoamento para uma perda de carga de 50 mm. Este valor caracteriza o geossintético em estudo e designa-se por índice de velocidade para uma perda de carga de 50 mm, VI_{H50} .

A espessura dos geotêxteis varia durante a realização dos ensaios, graças à variação da pressão da água sobre a sua superfície. É, portanto, por isso, que é necessária a utilização de grandezas independentes do valor da espessura dos materiais. A propriedade hidráulica dos geotêxteis que está associada à permeabilidade normal ao plano do material é designada como permissividade, sendo notada como ψ (s^{-1}). A permissividade é obtida através da divisão do valor da velocidade V_{20} ou VI_{H50} pela perda de carga, Δh (m), como se pode ver na seguinte expressão, [Moreira (2009)]:

$$\psi = \frac{V_{20}}{\Delta h} \quad (4.18)$$

Já a obtenção do valor do coeficiente de permeabilidade, k_n (m/s), implica que se considere a espessura na avaliação da permeabilidade do material, e se multiplique o valor da permissividade pela espessura do material, Δx (m), como se pode observar na expressão (4.19).

$$k_n = \psi \Delta x \quad (4.19)$$

Para compreender um pouco melhor as expressões associadas à avaliação da permeabilidade normal ao plano faz-se de seguida a sua dedução, excluindo a influência da temperatura sobre a viscosidade da água.

Portanto considerando:

$$V_{20} = \frac{V}{A t} \quad (4.20)$$

e conjugando com as expressões (4.19) e (4.6) vem que:

$$V_{20} = \frac{Q}{A} \quad (4.21)$$

Atendo à equação de Darcy, ao esquema da Figura 13 e considerando $A = S$ tem-se que:

$$Q = k_n \frac{\Delta h}{\Delta x} S \quad (4.22)$$

em que Δh (m) é a perda de carga verificada no escoamento, Δx (m) é a espessura do provete e S (m²) a área do escoamento.

Ao definir-se permissividade hidráulica como o quociente entre o coeficiente de permeabilidade do material, k_n , e a espessura desse, Δx , vem:

$$\frac{Q}{S} = \psi \Delta h \quad (4.23)$$

Associando as expressões (4.23) e (4.21) resultam as seguintes expressões:

$$\psi = \frac{V_{20}}{\Delta h} \quad (4.18)$$

e

$$k_n = \psi \Delta x \quad (4.19)$$

O factor de correcção para a temperatura da água de 20 °C é calculado a partir da seguinte equação, em que T é a temperatura da água (°C):

$$R_T = \frac{1,762}{1 + 0,0337 T + 0,00022 T^2} \quad (4.24)$$

Além das considerações teóricas acerca deste ensaio, para avaliação da permeabilidade na direcção perpendicular ao plano dos geossintéticos, é particularmente importante abordar os procedimentos práticos seguidos e os aspectos técnicos do equipamento.

O equipamento utilizado, ilustrado na Figura 21, é constituído por dois reservatórios, posicionados a diferente nível, em que a água circula por meio de um circuito hidráulico composto por tubos de policloreto de vinilo (PVC) e em acrílico, com um diâmetro exterior de 90 mm. A água circula por gravidade do depósito a nível superior para o depósito a nível inferior, passando pelo sistema de aperto do tipo rosca macho-fêmea em liga metálica, Figura 22, que sustenta os provetes a ser ensaiados. Este sistema para acomodação dos provetes de geossintéticos permite que uma das partes deslize para o interior da outra, associado a uma grelha com a extremidade exterior em borracha, que comprimem a zona de bordo dos provetes e impedem a ocorrência de escoamentos paralelos. Desta forma, das amostras circulares com 130 mm de diâmetro, apenas uma área do provete com 85 mm de diâmetro fica exposta ao fluxo de água.

A água recolhida no depósito inferior é encaminhada por meio de uma bomba hidromecânica para o reservatório superior.

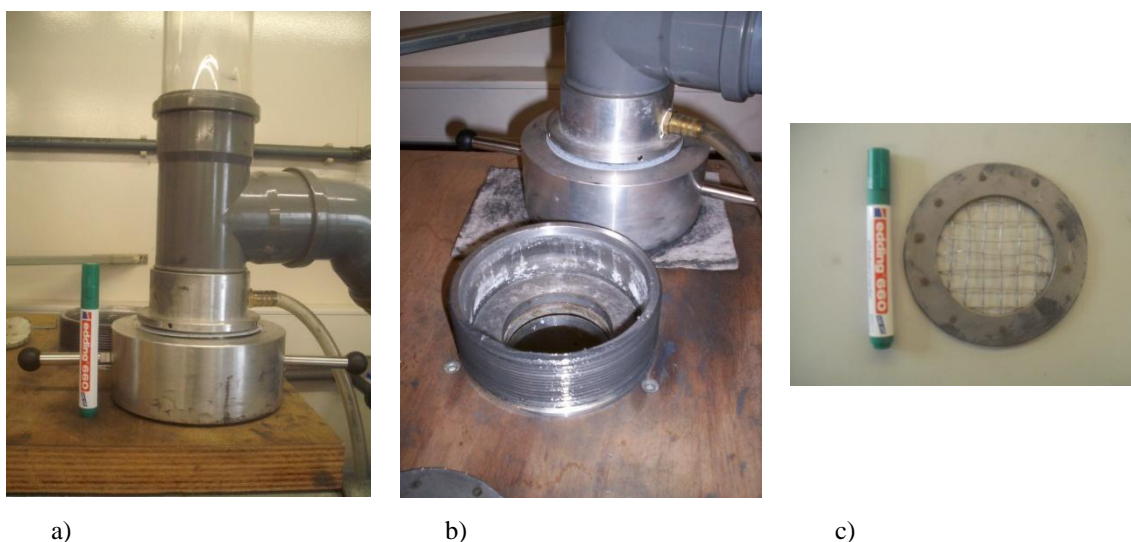


Figura 22. Sistema de aperto do provete: a) sistema montado; b) Sistema desmontado; c) Grelha de fixação.

Para a avaliação da carga hidráulica, o equipamento do LGS dispõe ainda de dois tubos piezométricos, ligados à tubagem a montante e a jusante do ponto de ensaio das amostras. A regulação das perdas de carga é realizada com recurso a um sistema móvel, que se encontra anexo aos tubos, que contém duas escalas graduadas com intervalos de 5 mm, Figura 23. Desta forma é possível ajustar, através das válvulas de abastecimento e de descarga, durante o decorrer do ensaio, o fluxo de água para os diversos valores de perda de carga. De acordo com a norma NP EN ISO 11058: 2003

(Ed.1)) o valor mais elevado para a perda de carga é de 70 mm, sendo que os restantes quatro valores deverão ser, aproximadamente, 0,8; 0,6; 0,4 e 0,2 vezes o valor máximo da perda de carga, começando com a velocidade mais alta e terminando com a velocidade mais baixa. Por equivalência tem-se que os restantes valores de perda de carga são 56 mm, 42 mm, 28 mm e 14 mm respectivamente.

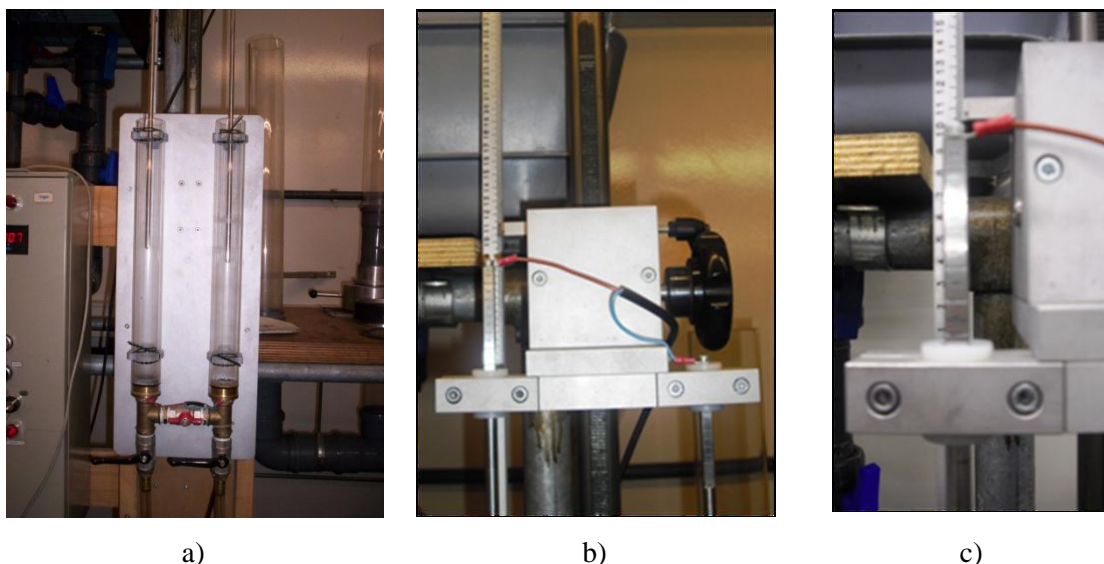


Figura 23. Sistema de regulação da perda de carga: a) tubos piezométricos; b) sistema de ajuste; c) escala graduada.

No que toca à metodologia de ensaio descrita na norma NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) esta estabelece, um total de 5 provetes, para cada ensaio de avaliação da permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos. O processo de amostragem, de recolha e de preparação dos provetes segue os princípios da norma NP EN ISO 9862: 2007 (Ed. 1)) cortados com um diâmetro de 130 mm e imersos em água por um período mínimo de 12 horas, de forma a permitir a saturação do material.

O ensaio começa então pela colocação do provete no equipamento, seguido do posicionamento da grelha metálica, com o bordo de borracha em contacto directo com o geossintético, e com o enroscar do sistema de aperto de forma a assegurar a estanquidade de todas as juntas.

A norma indica que no início do ensaio, para garantir a inexistência de bolhas de ar retidas no aparelho, deve ser regulada uma perda de carga hidráulica de 50 mm entre ambos os lados do provete. Procede-se ao corte do fluxo de água, e caso a carga hidráulica não se igualar, ou seja, se não se verificar que o desnível hidráulico entre os tubos piezométricos se equilibra, num intervalo de tempo máximo de 5 minutos, deve

considerar-se a possibilidade de existirem bolhas de ar retidas no aparelho, e repete-se o procedimento.

Tal como já foi referido anteriormente, este ensaio pretende caracterizar o escoamento a partir da água recolhida que passa através do sistema durante um determinado período de tempo, e para um dado valor de perda de carga. A norma NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1)) indica um volume de água mínimo recolhido de 1000 cm^3 num tempo mínimo de 30 segundos. Acrescenta, ainda, que para cada valor de perda de carga têm de ser realizadas três leituras consecutivas, espaçadas de 30 segundos cada, e que, para cada nível de perda de carga, é necessário que o regime de escoamento permaneça estável durante pelo menos 30 segundos.

Portanto para a realização deste ensaio começa-se por ajustar o fluxo, de modo a obter uma perda de carga de 70 mm, garante-se a sua estabilidade e procede-se à recolha da água passada, registando-se a respectivo tempo de recolha, a massa de água recolhida e a temperatura da água para as três leituras efectuadas. Procede-se de igual modo para os restantes valores de perda de carga designadamente de 56 mm, 42 mm, 28 mm e 14 mm.

A partir dos dados obtidos calcula-se a velocidade de escoamento para a temperatura de 20°C , faz-se a representação gráfica dos pares ordenados (velocidade; perda de carga), e ajusta-se uma curva polinomial de 2ª ordem que passe na origem. Assim, a partir da equação quadrática, procedendo à substituição de valores, é possível encontrar o valor de V_{20} correspondente à perda de carga de 50 mm. Desta forma, e de encontro ao objectivo deste procedimento laboratorial, consegue-se determinar o índice de velocidade, VI_{H50} , isto é, a velocidade do escoamento para uma perda de carga de 50 mm.

4.3.3. Avaliação da porosidade

4.3.3.1. Determinação da dimensão característica das aberturas

A norma NP EN ISO 12956: 2006 (Ed.1)) “ Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da dimensão característica da abertura”(ISO 12956: 1999), especifica um método de ensaio para a determinação da dimensão característica da abertura de uma camada simples de geotêxtil ou produto relacionado pelo método da peneiração húmida.

O método para avaliação da porosidade, descrito na norma, tem por princípio a lavagem de um material granular bem graduado com distribuição granulométrica conhecida, através de uma camada simples de geotêxtil ou produto relacionado usada como peneiro, sem carga. A dimensão característica das aberturas do geossintético, a ser avaliado, corresponde à dimensão específica do material granular passado, ou seja à dimensão aparente dos poros, O_{90} , do geossintético.

Este valor, O_{90} , é compreendido como a dimensão dos poros que permite que 90% das partículas de dimensão inferiores a d_n passem através do geossintético ou produto relacionado. Ou seja, se um material apresentar um valor x para o O_{90} , então 90% dos poros do geossintético apresenta uma dimensão inferior a x .

Para a realização do ensaio de porometria devem ser seguidas diversas etapas. A parte inicial do procedimento implica a preparação dos provetes em que se cortam as amostras com forma circular, seguindo as indicações da norma NP EN ISO 9862: 2007, com um diâmetro de 200 mm. É aconselhável, durante esta fase, fazer a perfuração do perímetro exterior do provete nos pontos de fixação entre este e o encaixe do suporte do peneiro. A etapa seguinte compreende a secagem do provete a uma temperatura inferior a 70 °C, em que se pretende que entre medições consecutivas o seu peso estabilize. Verificada esta condição regista-se a massa de cada provete seco. Posteriormente coloca-se os provetes submersos em água, a deixar saturar, por um período mínimo de 12h.

O equipamento de ensaio, Figura 24, é constituído por um conjunto de fixação do provete, nomeadamente o peneiro, o suporte do peneiro e um anel metálico. E outra parte que engloba a mesa vibratória, o encaixe do peneiro com base inclinada e tubo de descarga e a tampa que irriga o material granular. Além deste equipamento o sistema de abastecimento de água tem, para controlo do caudal, um manómetro de pressão com válvula e um medidor de caudal.



Figura 24. Equipamento para realização do ensaio de porometria: a) mesa vibratória; b) sistema de fixação do provete.

O ensaio tem início com a colocação do provete, depois de saturado, no suporte do peneiro. De seguida assenta-se o peneiro sobre o provete, encaixa-se ao anel metálico e aparafusa-se a ligação de todo o conjunto.

O material granular utilizado para este ensaio é constituído por uma mistura de dois solos cujas dosagens foram estudadas de modo a atender às características específicas na norma de ensaio. A curva granulométrica do solo deve possuir um coeficiente de uniformidade (C_u) compreendido entre 3 e 20 ($3 \leq C_u \leq 20$) e o valor de O_{90} deve estar compreendido entre d_{20} e d_{80} , para melhorar a exactidão da determinação da dimensão característica da abertura do geotêxtil. O solo é constituído por uma areia SP45, com massa de 53,1 g e uma farinha de sílica, com massa de 167,9 g Silva (2010).

O material granular é espalhado uniformemente sobre o geossintético, de forma cuidadosa, garantido que não existem perdas de material. Na fase seguinte o conjunto de fixação do provete, juntamente com o material granular, são dispostos sobre a base inclinada e fixos com bocal de pulverização à mesa vibratória.

Depois de regulada a pressão da rede a 300 kPa, através do manómetro de pressão adjacente à fonte de alimentação de água, após o ajuste da amplitude de vibração da mesa para 1,5 mm abre-se o fornecimento de água e recolhe-se o material granular que passa através do provete. É importante que a regulação do caudal que entra no sistema se mantenha num mínimo de 0,5 l/minuto. O período de peneiração indicado pela norma

é de 600 segundos, pelo que atingido este tempo desliga-se o dispositivo de peneiração e fecha-se o fornecimento de água.

Para além da recolha do material passado, recolhe-se também o provete juntamente com qualquer material granular retido. É boa prática durante esta fase lavar com água, de forma delicada, a tampa de pulverização e fazer a sua recolha para o mesmo recipiente de acondicionamento do provete e do material retido. Desta forma previne-se a perda de solo durante o procedimento prático.

A segunda fase deste ensaio engloba a secagem em separado, do material granular passado e do provete com o material granular retido, o segundo a uma temperatura máxima de 70 °C. Depois de garantida a secagem completa, por estabilização do peso entre pesagens sucessivas, tanto do solo passado como do provete com o material retido a norma NP EN ISO 12956: 2006 (Ed.1)) indica que se deve determinar a massa seca do material granular retido pesando o provete que contém o material granular retido e subtraindo a massa seca do provete, com uma exactidão de 0,1 grama. E obter igualmente a massa seca do material granular que passou.

De acordo com a norma de ensaio, devem ser testado três provetes por material, ainda que, se a massa combinada do material granular retido e que passou diferir mais do que 1% da massa seca total inicial, o ensaio é inválido e deve ser repetido. A norma estabelece ainda que se alguma das massas do material granular passado através dos provetes variar relativamente à média, mais do que 25%, então devem ser ensaiados mais dois provetes.

O objectivo final deste ensaio centra-se na combinação do material granular que passou através dos provetes individuais e determinar a sua distribuição granulométrica. Este procedimento traduz-se no traçar da curva granulométrica do material passado através do geossintético com os resultados obtidos da peneiração e determinar a dimensão característica das partículas do solo O_{90} , correspondente ao valor de 90% das partículas passadas.

4.4.Ensaio de danificação

4.4.1. Introdução

Tal como para os ensaios hidráulicos, neste grupo definem-se as respectivas referências normativas que regulam e permitem recriar condições de danificação durante a

instalação e de abrasão para os materiais estudados. Para esse feito descrevem-se as várias etapas a seguir durante a elaboração de ensaios a geotêxteis ou produtos relacionados, especialmente a danificação durante a instalação causado por material granular e a simulação do dano por abrasão, seguindo o ensaio de bloco deslizante.

4.4.2. Ensaio de DDI

A norma EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007), estabelece e descreve os procedimentos a seguir no ensaio laboratorial de DDI.

O princípio do ensaio baseia-se na colocação de um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético (corundum), sendo este submetido a uma tensão dinâmica, durante um determinado período de tempo. Após esse período o provete é retirado do equipamento e submetido a uma inspeção visual e um ensaio mecânico ou hidráulico, para se avaliar as alterações sofridas nas propriedades correspondentes do provete. O resultado das alterações sofridas deve ser expresso em termos de variação (em percentagem), da propriedade de referência, devendo ser incluído no relatório do ensaio os danos visuais observados [Rosete (2010)].

No que toca ao equipamento utilizado para simulação da danificação durante a instalação, pode-se distinguir entre o sistema de carregamento e o material de danificação.

O primeiro inclui o mecanismo de carregamento que pode ser controlado, de forma a produzir uma pressão sinusoidal, na placa de carregamento, entre os 500 ± 10 kPa e $5 \pm 0,5$ kPa, a uma frequência de 1 Hz. Compreende ainda a caixa de danificação que, segundo a referida norma, não deve apresentar dimensões em planta inferiores a 300×300 mm², ainda que constituída por duas partes, justapostas por encaixe, com altura de 75 mm cada. Esta caixa, durante o ensaio, contém o geossintético a danificar envolto em material granular, pelo que a norma recomenda que seja metálica e rígida. O sistema de carregamento fica completo com a placa de carregamento, de dimensões 100×200 mm², adequada para transmitir as cargas ao agregado sem sofrer flexão, sendo que a norma estabelece que seja de metal ou alumínio, este último o material constituinte da placa do equipamento disponível no LGS da FEUP.

O segundo, o material granular utilizado no processo de danificação que pode apresentar várias nuances mediante as condições naturais que se pretendem simular. Neste trabalho seguiu-se a norma ISO/FDIS 10722: 2007(E)) que indica a utilização de um agregado sintético de óxido de alumínio, o *corundum*, com dimensões entre os 5 mm e 10 mm. A referida norma indica que o material deve ser peneirado, e o material passado eliminado, antes da sua primeira utilização e a cada três utilizações, com o peneiro de 5 mm. Estabelece ainda um máximo de 20 utilizações por cada porção de material usado. Na Figura 25, apresenta-se o aspecto geral do equipamento disponível no LGS da FEUP, utilizado para a realização dos ensaios.

O começo do ensaio, de acordo com a norma ISO/FDIS 10722: 2007(E)) inclui a preparação de cinco provetes para cada direcção do geossintético a ensaiar. A dimensão de cada provete deve ser: 1,0 m de comprimento e entre 0,5 m e 0,6 de largura, pelo que esta amostra deve ser cortada em duas mais pequenas com 1,0 m de comprimento e entre 0,25 m e 0,3 m de largura. Uma das partes para ser usada no ensaio de danificação e a outra para ser utilizada no ensaio de referência. Nos ensaios levados a cabo ensaiou-se os provetes na direcção correspondente à direcção de fabrico dos geossintéticos, e as dimensões adoptadas para cada provete foram de 1,0×0,25 m. Não foram realizados ensaios de referência para a DDI, sendo que a comparação dos resultados obtidos foi feita em relação aos provetes intactos.

A norma indica ainda que os ensaios devem atender às condições padrão definidas na norma ISO 554: 1976) "Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications"(65±5% de humidade relativa e 20±2°C de temperatura).

Após a preparação dos provetes, inicia-se o procedimento de ensaio ao preencher a parte inferior da caixa metálica com agregado. A altura de 75 mm, da parte inferior da caixa, é cheia em duas camadas de material com igual altura, e cada uma das camadas é compactada, com uma placa metálica rígida colocada sobre toda a área da caixa, através da aplicação de uma tensão de 200±2 kPa durante um período de 60 segundos.

Seguidamente sobrepõe-se o provete às camadas de agregado, tendo o cuidado de alinhar o centro do provete com o centro da caixa.

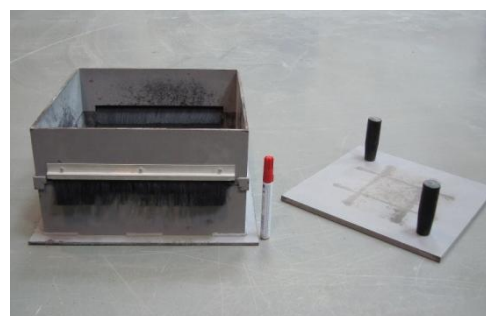
Procede-se ao encaixe da parte superior da caixa sobre a parte inferior e completa-se com agregado solto até alcançar os 75 mm de altura acima do geossintético. O provete fica, então, a meio da caixa, em contacto directo acima e abaixo com o material granular de danificação. A caixa é colocada sob a placa de carga, centrada com esta, e aplica-se

uma tensão de $5 \pm 0,5$ kPa. A fase de carregamento faz-se em 200 ciclos, com uma frequência de 1 Hz e pela aplicação de uma tensão que varia entre os $5 \pm 0,5$ kPa e 500 ± 10 kPa.

O ensaio só fica terminado com a remoção do material granular e do provete, de forma delicada, evitando a possibilidade de acrescer alguma forma de danificação. Advém do resultado deste ensaio a observação visual da danificação existente no provete e o ensaio de referência deste, de maneira a aferir acerca as alterações sofridas nas propriedades de referência do geossintético.



a)



b)



c)

Figura 25. Equipamento de simulação da DDI: a) vista geral do equipamento; b) caixa de danificação e placa metálica; c) material granular sintético.

4.4.3. Ensaio de abrasão

O princípio do ensaio baseia-se na colocação de um provete numa plataforma fixa onde este será friccionado por um abrasivo com características de superfície GTX. O abrasivo é movido ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, sob condições controladas de pressão e acção abrasiva. A resistência à abrasão do provete é

determinada pela perda das propriedades de tracção do provete, em percentagem [Rosete (2010)].

A norma NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1))– Geotêxteis e produtos relacionados - Simulação do dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante) (ISO 13427:1998), especifica um método de ensaio para determinação da resistência de geotêxteis à abrasão usando um bloco deslizante. Após abrasão são avaliadas as alterações provocadas às propriedades dos geossintéticos ensaiados.

A Figura 26 apresenta o equipamento laboratorial para simulação da abrasão, de acordo com a NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)) disponível no LGS da FEUP. Este equipamento, o abrasímetro, é constituído por dois pratos paralelos macios, com dimensões $500 \times 200 \text{ mm}^2$, um dos quais capaz de adquirir um movimento vaivém na direcção horizontal, e o outro suportado rigidamente por uma alavanca dupla para proporcionar um movimento livre na direcção perpendicular à do prato vaivém. Ambos os pratos estão equipados com garras em cada extremidade para prender o provete e o abrasivo. O abrasímetro é constituído ainda por um conjunto de pesos a aplicar sobre os pratos e por um sistema mecânico, associado a um indicador de contagem dos ciclos, que induz um movimento linear sobre o prato inferior.



Figura 26. Equipamento laboratorial para simulação da abrasão de acordo com a NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1)).

Em relação aos provetes, considerando a EN 963:1995) (Geotextiles and geotextile-related products. Sampling and preparation of test specimens.), devem ser cortados com as dimensões de $430 \times 200 \text{ mm}^2$ e os correspondentes abrasivos devem ter as medidas de

220×385 mm². A maior dimensão nos provetes de geossintético corresponde à direcção na qual se pretende simular a abrasão.

Após a preparação dos provetes, a próxima etapa do procedimento consiste em colocar o provete a ensaiar no prato superior, preso com as garras existentes em cada extremidade do prato. De forma similar, ao prato inferior (vaivém) prende-se, também recorrendo às garras, uma lixa de esmeril com abrasivo P 100. Baixa-se o prato superior até ao prato inferior, garantindo que o meio abrasivo e o provete ficam adequadamente alinhados, e carrega-se com três níveis de peso de modo a que a carga sobre o geossintético seja de $6 \pm 0,01$ kg, incluindo o prato superior. Na Figura 27 apresentam-se os procedimentos descritos anteriormente.

O equipamento deve trabalhar a uma frequência máxima de 90 ciclos por minuto e deve funcionar com essa frequência durante 750 ciclos, ou até à rotura do provete.



a)



b)



c)



d)

Figura 27. Etapas para realização do ensaio de abrasão: a) fixação do provete à placa deslizante; b) fixação da película abrasiva à placa estacionária; c)

colocação da placa superior sobre a placa deslizante; d) carregamento da placa superior com os pesos.

É importante durante a realização dos ensaios verificar se tanto o geossintético como o material abrasivo deslizam nas garras. Se tal acontecer a norma recomenda que se despreze o provete e ensaie outro após serem efectuados os ajustes necessários.

Dado por finalizado o ensaio retira-se o provete cuidadosamente, prevenindo a possibilidade de ocorrer danificação adicional, e submete-se o provete ao tipo de ensaio para o qual se pretende avaliar as propriedades afectadas. O abrasivo é substituído após cada ensaio.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. Programa de ensaios

O programa de ensaios executado no LGS da FEUP abrangeu a caracterização do comportamento hidráulico de dois geossintéticos diferentes, nomeadamente o geotêxtil GTX e do geocompósito GCR. Para tal realizaram-se ensaios para avaliação da permeabilidade no plano do material e da permeabilidade perpendicular ao plano do material, em provetes intactos, sujeitos a ensaios de simulação da DDI e de abrasão.

Na Tabela 8, apresenta-se de forma sucinta, o plano de ensaios de caracterização executado e o correspondente número de provetes ensaiados para cada geossintético.

Como se pode verificar, foram ensaiados amostras do GTX e do GCR intactas, após submetidas aos efeitos da DDI, da abrasão e da DDI e da abrasão.

Tabela 8. Plano de ensaios realizado.

Ensaio		Permeabilidade no Plano				Permeabilidade Perpendicular ao Plano			
		Tipo de Amostra							
		Intacto	DDI	Abrasão	DDI+Abrasão	Intacto	DDI	Abrasão	DDI+Abrasão
Geossintético	GTX	3	3	3	3	5	5	5	5
	GCR	3	3	3	3	5	5	5	5
Total		24				40			

5.2. Ensaio de permeabilidade no plano do material

5.2.1. Considerações iniciais

Para o ensaio de avaliação da permeabilidade no plano do material seguiu-se o procedimento descrito na secção 4.3.2.1. De acordo com o método descrito, contabilizou-se a massa de água que atravessou cada provete para um dado período de tempo, considerando a pressão de compressão, a temperatura da água e a variação de espessura de cada provete.

Os resultados apresentados compreendem a determinação de três parâmetros, nomeadamente, do coeficiente hidráulico, $q_{\text{pressão/gradiente}}$ (m^2/s), da transmissividade, θ (m^2/s) e do coeficiente de permeabilidade, k_p (m/s). Os valores obtidos para os anteriores parâmetros aparecem ainda indicados em gráficos em que se relacionam em função da tensão normal para os dois gradientes hidráulicos utilizados.

O tratamento dos dados obtidos e o cálculo das grandezas que caracterizam a permeabilidade do material permitem aferir acerca do seu comportamento e de que forma a danificação do geossintético por DDI, abrasão e pelo seu efeito conjunto modifica as características de permeabilidade do material. Para este efeito tratou-se de calcular algumas figuras estatísticas, nomeadamente, o coeficiente de variação (c.v.) dos provetes ensaiados, de forma a perceber a dispersão dos valores obtidos, e ainda a variação do coeficiente hidráulico, Δq (%), no que se refere à redução de $q_{\text{pressão/gradiente}}$ associado à variação dos valores de gradiente hidráulico, i , de 1,0 para 0,1.

5.2.2. Geotêxtil GTX

5.2.2.1. Provetes intactos

Na Tabela 9 apresentam-se os valores médios obtidos para provetes intactos do geotêxtil GTX considerando uma temperatura da água de 20°C. Nas Figuras 28, 29 e 30 percebe-se a evolução destas grandezas para diferentes pressões normais de compressão e para os dois valores de gradiente hidráulico utilizados.

Tabela 9. Valores médios e do coeficiente de variação do coeficiente hidráulico, da transmissividade e do coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX intactos.

RESUMO DE RESULTADOS - PROJETOS DO GEOTÊXTEL GTX INTACTOS							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}}$ (m ² /s)	valor médio	1,50E-06	1,14E-05	7,34E-07	3,90E-06	4,55E-07	2,19E-06
	c.v (%)	4,99	16,12	29,74	11,16	39,92	4,36
	Δq (%)	86,84		81,20		79,25	
Transmissividade θ (m ² /s)	valor médio	1,50E-05	1,14E-05	7,34E-06	3,90E-06	4,55E-06	2,19E-06
	c.v (%)	4,99	16,12	29,74	11,16	39,92	4,36
Coeficiente de Permeabilidade k_p (m/s)	valor médio	1,19E-03	9,10E-04	8,92E-04	5,02E-04	7,65E-04	3,87E-04
	c.v (%)	8,18	16,74	30,87	8,51	39,14	8,98

Os valores nominais, anunciados pelo fabricante do GTX, para o coeficiente hidráulico considerando uma tensão de 20 kPa e 100 kPa, utilizando um valor de gradiente de 1,0, são de $1,10 \times 10^{-5}$ e $4,1 \times 10^{-6}$, respectivamente. Verifica-se que os valores obtidos estão

próximos dos valores anunciados pelo fabricante para este parâmetro e a comparação directa entre eles atesta o rigor e o controlo dos resultados.

Na Figura 28 é visível a diminuição do coeficiente hidráulico com o aumento de pressão para os dois gradientes utilizados. Verifica-se a mesma relação para os valores de transmissividade, Figura 29, e de coeficiente de permeabilidade, Figura 30. Este efeito é explicado pela diminuição da secção de escoamento em resultado do aumento directo da pressão de compressão, com a redução da espessura dos provetes e a diminuição da quantidade de água que os atravessa.

Regista-se, também, que a variação do coeficiente hidráulico com a diminuição do gradiente de 1,0 para 0,1, para a pressão de compressão de 20, 100 e 200 kPa, se fixa numa percentagem de aproximadamente 87%, 81% e 80% respectivamente. Portanto para um gradiente de 1,0 o volume de água que escoar através dos provetes é, consideravelmente, superior.

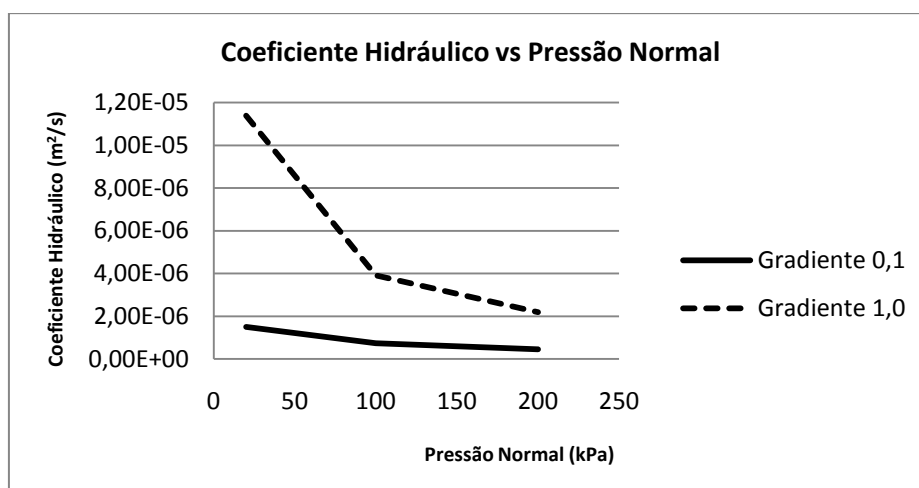


Figura 28. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.

Em relação aos valores de transmissividade obtidos importa mencionar, novamente, que este parâmetro resulta do quociente entre o coeficiente hidráulico e o valor de gradiente hidráulico. A partir dos valores da Tabela 9 e da sua representação gráfica, na Figura 29, verifica-se que, para o gradiente de 0,1, os valores de transmissividade são superiores, apesar de que, quantitativamente, a diferença entre valores de gradientes diferentes seja muito pequena.

Para o coeficiente de permeabilidade considera-se a espessura do material pelo que este é tanto maior quanto maior for a espessura do provete. Contudo pela análise do gráfico

da Figura 30 e do declive das rectas que unem valores sucessivos é possível afirmar que para valores da tensão de compressão mais elevados o coeficiente de permeabilidade parece ter tendência a estabilizar.

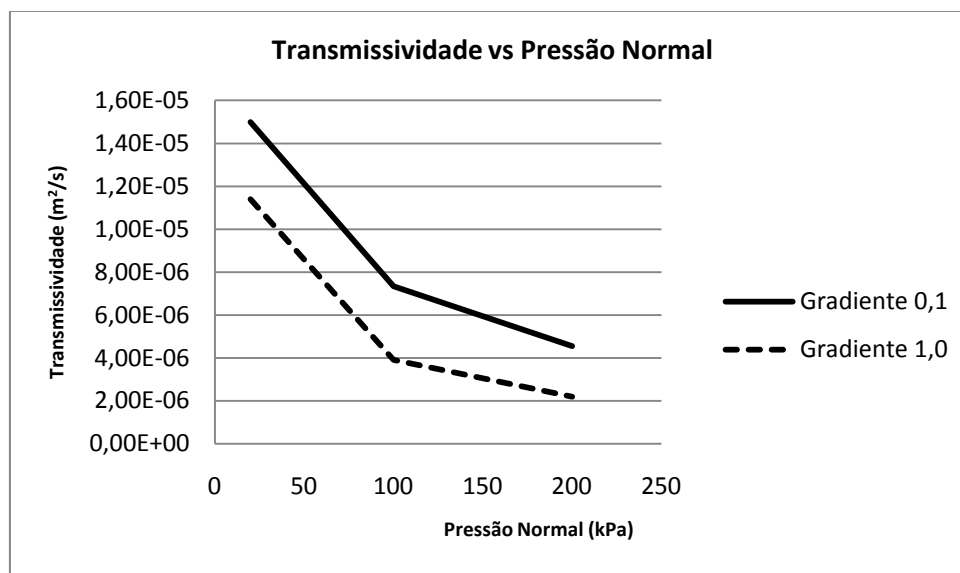


Figura 29. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.

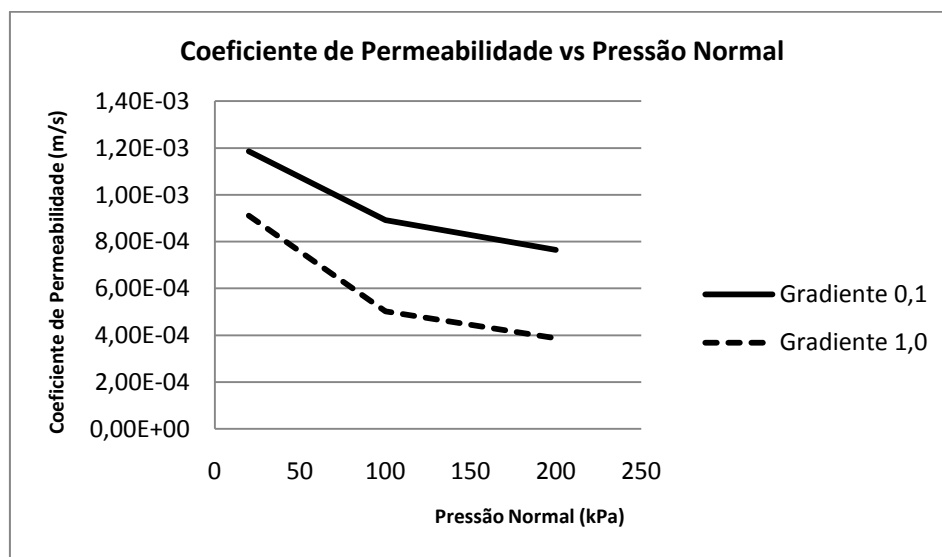


Figura 30. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos do geotêxtil GTX.

5.2.2.2. Provetes sujeitos a DDI

Após o ensaio de simulação de danificação durante a instalação os provetes sujeitos a este processo apresentam partículas finas incrustadas na superfície do geotêxtil, Figura 31. Estas partículas são parte do material de desgaste, partículas fragmentadas de *corundum*, que resultam do seu fraccionamento durante a aplicação do carregamento.

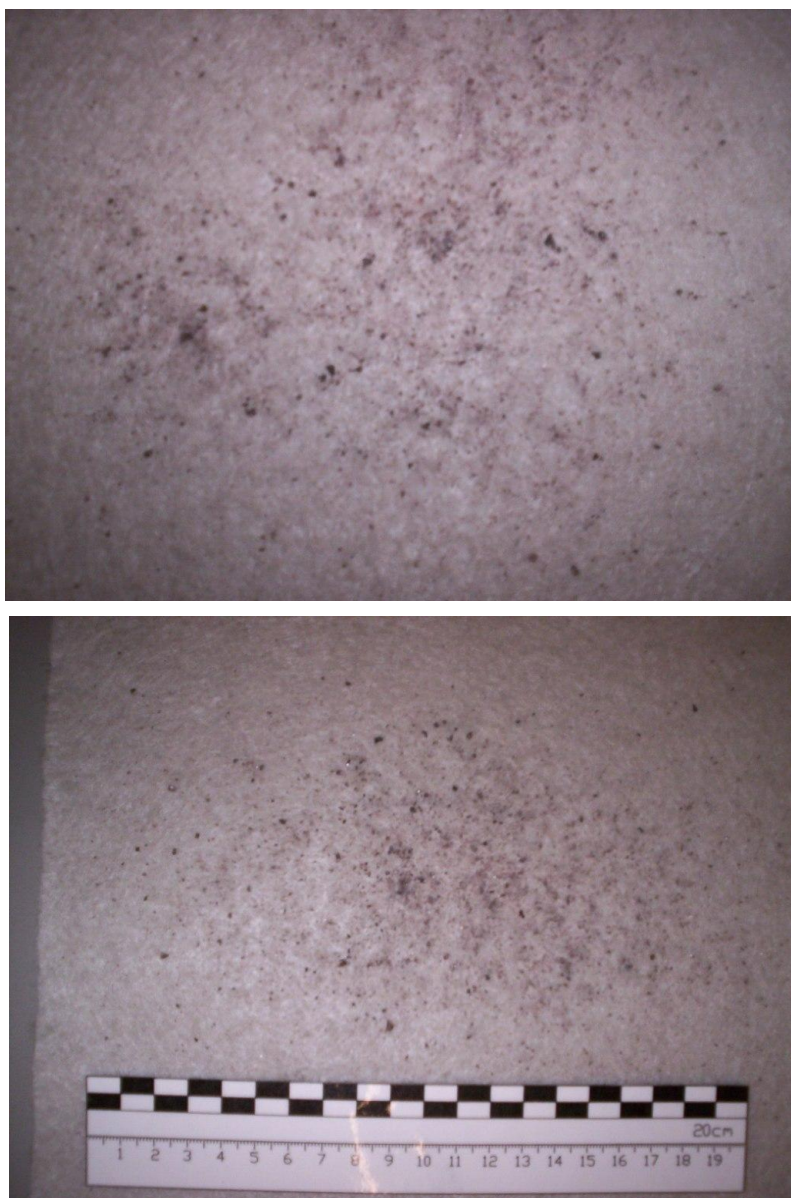


Figura 31. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de DDI em laboratório.

Na Tabela 10 são indicados os valores obtidos para as gradezas já referidas anteriormente. Para os valores de coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade, os gráficos das Figuras 32, 33 e 34 revelam uma diminuição destes parâmetros com o aumento da pressão de compressão, para o gradiente de 1,0. Já para o gradiente de 0,1, embora o coeficiente hidráulico baixe com o aumento da pressão de 20 para 100 kPa, para o aumento de 100 para 200 kPa o gradiente estabiliza. Em consequência deste facto os valores de transmissividade e do coeficiente de permeabilidade, Figura 33 e 34 respectivamente, para o gradiente de 0,1, para o mesmo aumento de pressão, também aumentam. Uma possível hipótese para esta situação poderá ter como origem a existência das partículas de *corundum* no geotêxtil que funcionam como barreira à progressão da água e fazem diminuir o volume de água passada para perdas de carga mais baixas. Outro factor pode-se dever ao facto de que sob as mesmas condições de pressão e gradiente hidráulico, a espessura após DDI seja maior devido à provável incompressibilidade das partículas de *corundum* incrustadas.

Tabela 10. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos a DDI.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOTÊXTIL GTX SUJEITOS A DDI							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	4,80E-06	3,27E-05	8,11E-07	3,45E-06	8,66E-07	1,29E-06
	c.v (%)	25,72	16,01	39,06	15,36	26,33	9,62
	Δq (%)	85,32		76,49		33,06	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	4,80E-05	3,27E-05	8,11E-06	3,45E-06	8,66E-06	1,29E-06
	c.v (%)	25,72	16,01	39,06	15,36	26,33	9,62
Coeficiente de Permeabilidade k_p (m/s)	valor médio	5,11E-03	3,55E-03	1,24E-03	6,44E-04	1,72E-03	2,63E-04
	c.v (%)	21,70	13,32	39,43	41,35	29,28	9,76

Importa ainda dizer que os valores do coeficiente hidráulico, do gradiente de 1,0 para 0,1, e para as pressões de 20, 100 e 200 kPa apresentam uma redução de 85%, 76% e 33%. Para este último valor de pressão a variação do coeficiente hidráulico é consideravelmente inferior aos restantes valores.

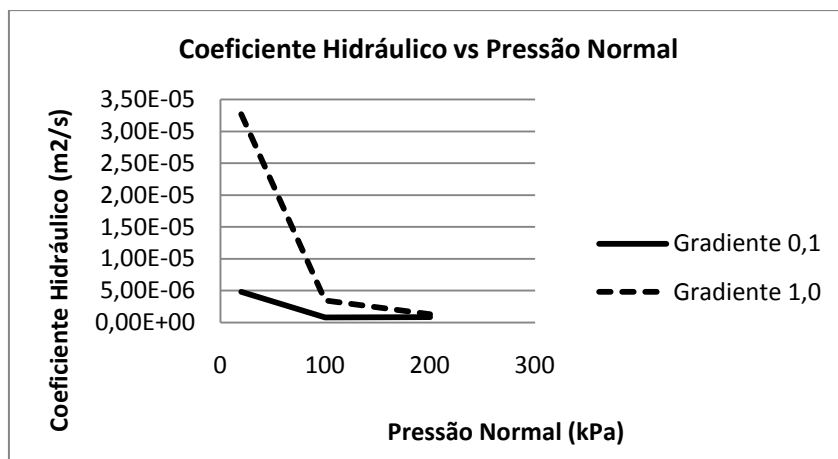


Figura 32. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.

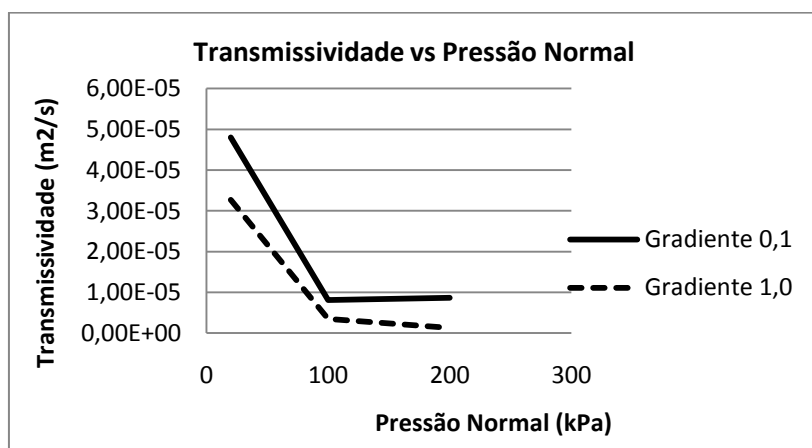


Figura 33. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.

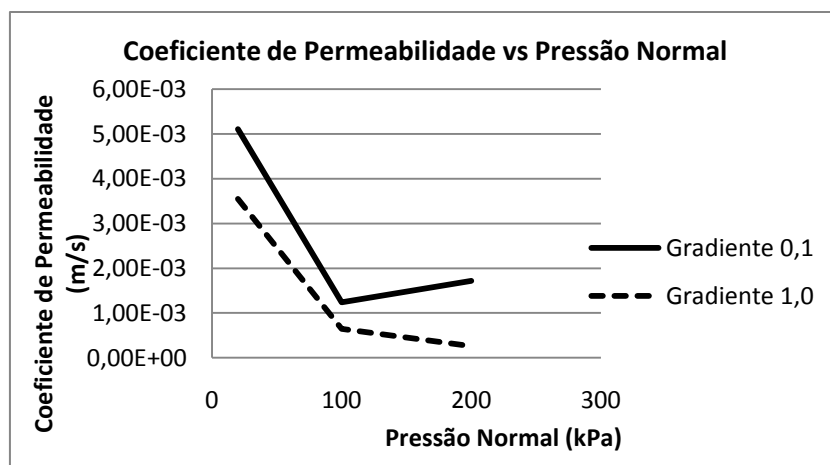


Figura 34. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geotêxtil GTX.

5.2.2.3. Provetes sujeitos a abrasão

Na secção 3.4.1 a Tabela 1, adaptada de Van Dine, *et al.* (1982) enumera os principais processos de abrasão que aparecem pela realização deste ensaio. Nos provetes de geotêxtil GTX sujeitos a abrasão, e de acordo com a referida tabela, verifica-se a desagregação da superfície, Figura 35, em que os filamentos exteriores são parcialmente desagregados da estrutura que compõe o geotêxtil. Da análise visual dos provetes, atendendo à espessura deste geotêxtil, este não apresenta um nível de danificação muito acentuado.

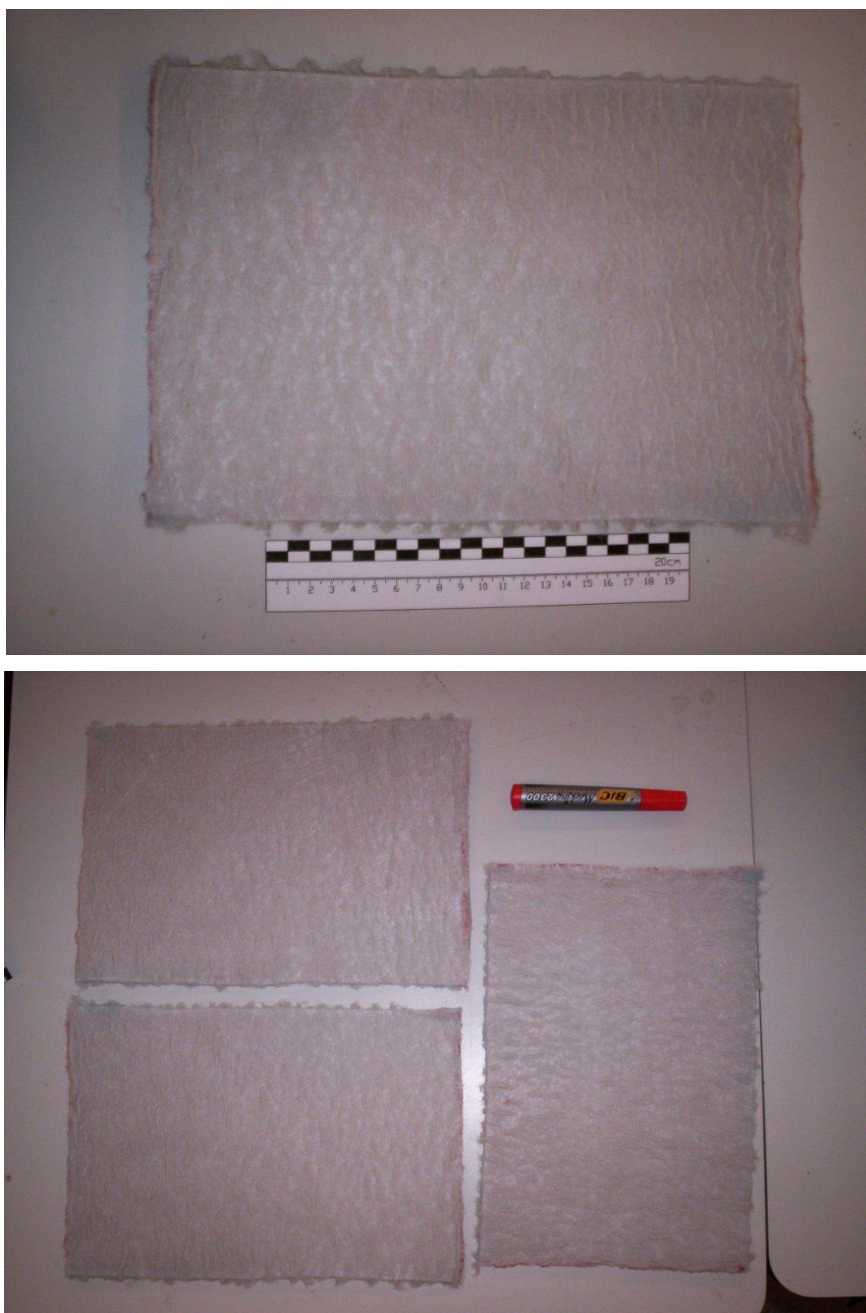


Figura 35. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de abrasão em laboratório.

Os resultados obtidos para o coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade, à semelhança dos valores obtidos para provetes intactos, evidenciam uma diminuição destas grandezas com o aumento da pressão de compressão, como é perceptível através dos valores da Tabela 11 e das Figuras 36, 37 e 38. Este aspecto é explicado também pela variação da espessura dos provetes com redução da secção de escoamento. Em relação à variação do coeficiente, entre os dois gradientes hidráulicos, verifica-se uma redução de aproximadamente 85%, 79% e 58% para as pressões de 20, 100 e 200 kPa. Para este caso, de forma semelhante aos provetes submetidos a DDI, para a pressão de 200 kPa a variação do coeficiente hidráulico é mais reduzida.

Tabela 11. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos a abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOTÊXTIL GTX SUJEITOS A ABRASÃO							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	3,59E-06	2,41E-05	1,39E-06	6,63E-06	9,95E-07	2,35E-06
	c.v (%)	28,13	7,20	13,82	9,72	11,05	7,61
	Δq (%)	85,10		78,98		57,64	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	3,59E-05	2,41E-05	1,39E-05	6,63E-06	9,95E-06	2,35E-06
	c.v (%)	28,13	7,20	13,82	9,72	11,05	7,61
Coeficiente de Permeabilidade k_p (m/s)	valor médio	5,46E-03	3,72E-03	2,75E-03	1,37E-03	2,41E-03	5,99E-04
	c.v (%)	25,83	7,06	12,73	9,07	7,40	5,22

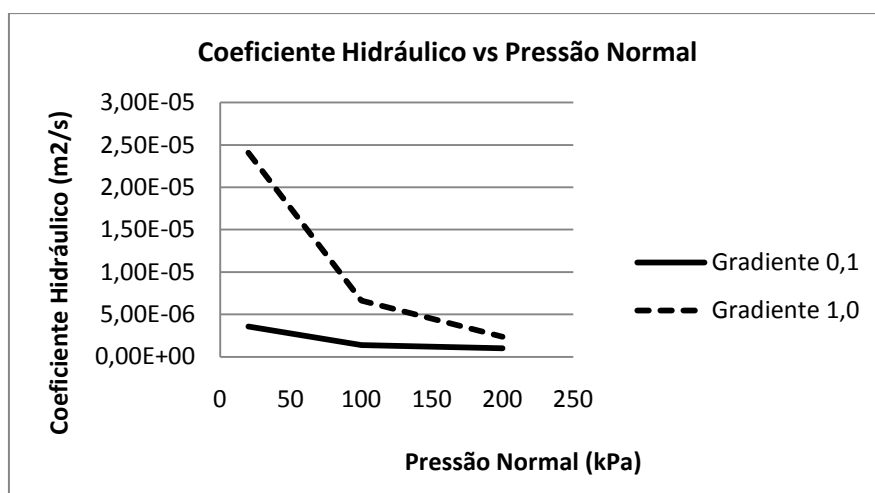


Figura 36. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.

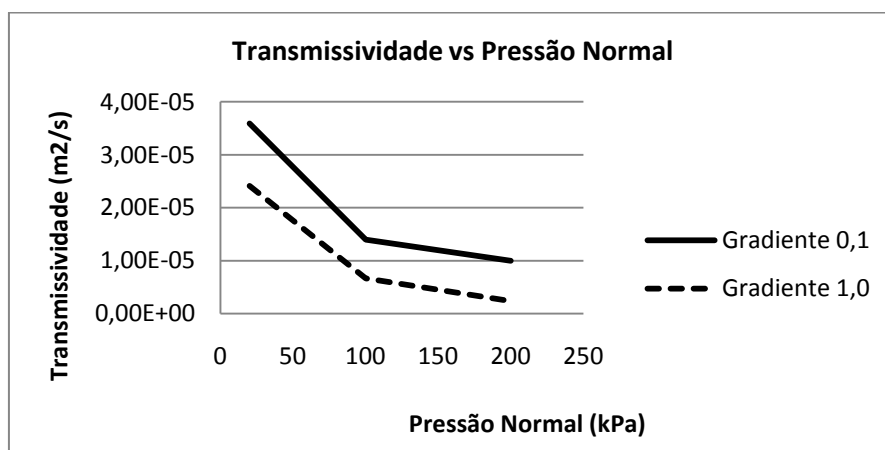


Figura 37. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.

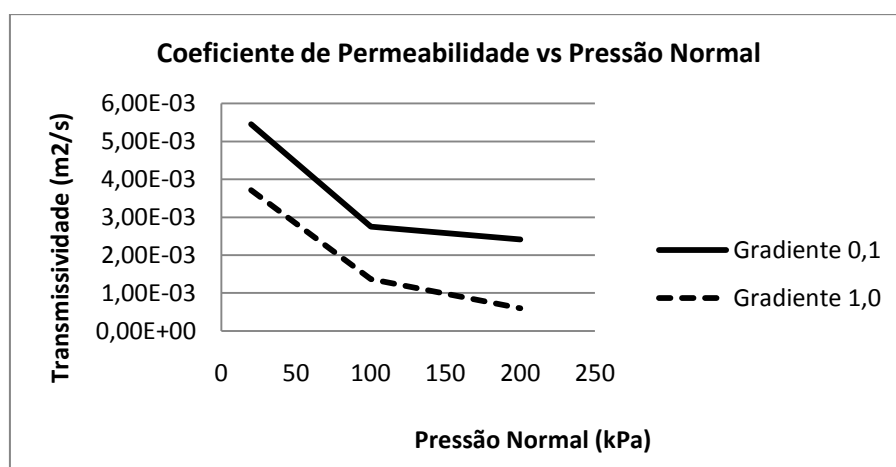


Figura 38. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geotêxtil GTX.

5.2.2.4. Provetes sujeitos ao efeito combinado de DDI e abrasão

Para os provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão, por esta ordem, e ainda de acordo com a secção 3.4.1 e a Tabela 1, adaptada de Van Dine, *et al.* (1982) observa-se o alinhamento de filamentos, a desagregação superficial do geotêxtil e o corte de filamentos superficiais. Na Figura 39 é possível verificar a reorientação dos filamentos, desagregados da estrutura do geotêxtil, na direcção do movimento.

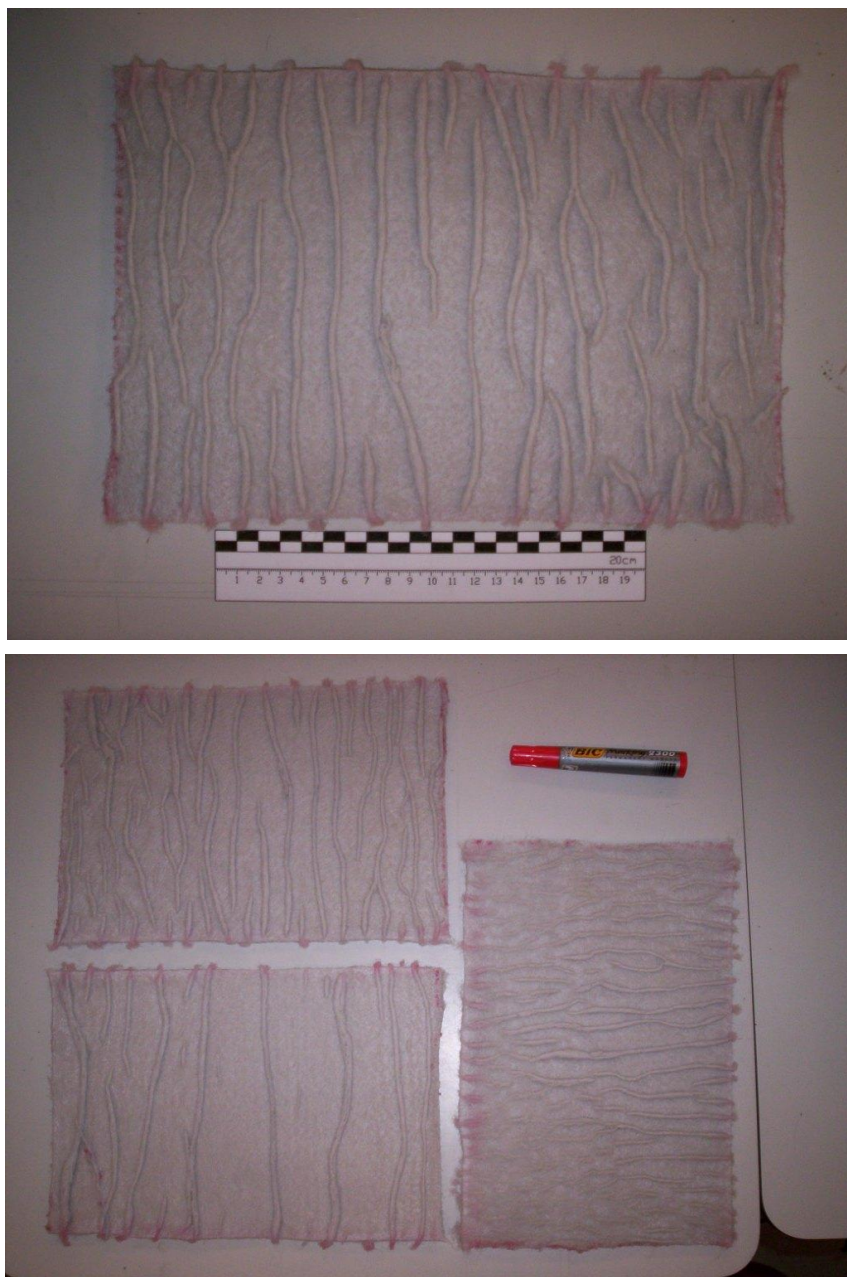


Figura 39. Aspecto do geotêxtil GTX após ensaio de abrasão em laboratório.

De forma similar aos resultados obtidos para provetes intactos e sujeitos a abrasão, também agora, em que se analisa o efeito conjunto da DDI e abrasão, os valores obtidos, Tabela 12, para o coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade, demonstram uma diminuição destas grandezas com o aumento da pressão de compressão e consequente redução da secção de escoamento, Figuras 40, 41 e 42. Em relação à variação do coeficiente hidráulico, de 1,0 para 0,1, verifica-se uma redução de aproximadamente 89%, 72% e 63% para as pressões de 20, 100 e 200 kPa, sendo que para a pressão de 200 kPa a variação do coeficiente hidráulico é mais baixa, Figura 40.

Tabela 12. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOTÊXTEL GTX SUJEITOS A DDI+ABRASÃO							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	4,08E-06	3,63E-05	1,62E-06	8,89E-06	1,16E-06	3,15E-06
	c.v (%)	22,37	11,36	13,37	7,89	5,75	9,95
	Δq (%)	88,76		81,82		63,24	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	4,08E-05	3,63E-05	1,62E-05	8,89E-06	1,16E-05	3,15E-06
	c.v (%)	22,37	11,36	13,37	7,89	5,75	9,95
Coeficiente de Permeabilidade k_p (m/s)	valor médio	4,45E-03	3,93E-03	2,48E-03	1,61E-03	2,29E-03	6,39E-04
	c.v (%)	30,59	4,05	17,71	25,74	8,87	5,09

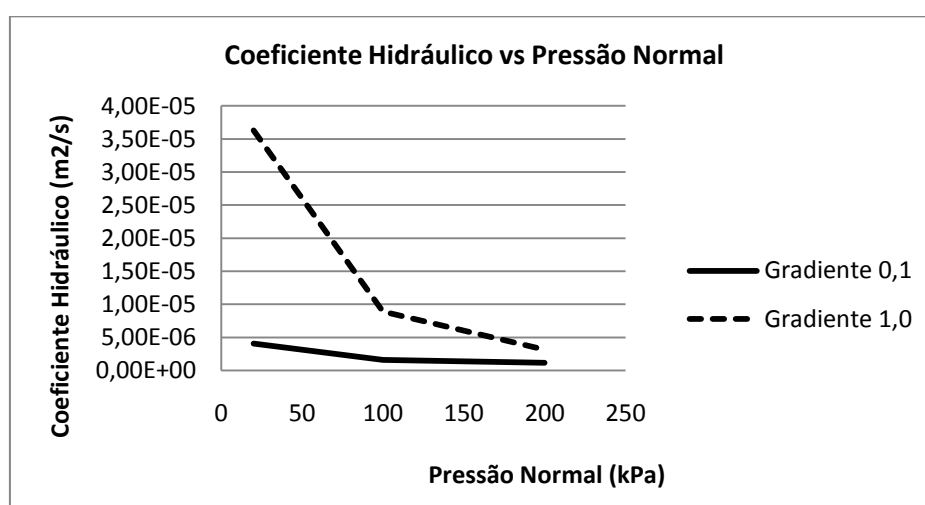


Figura 40. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.

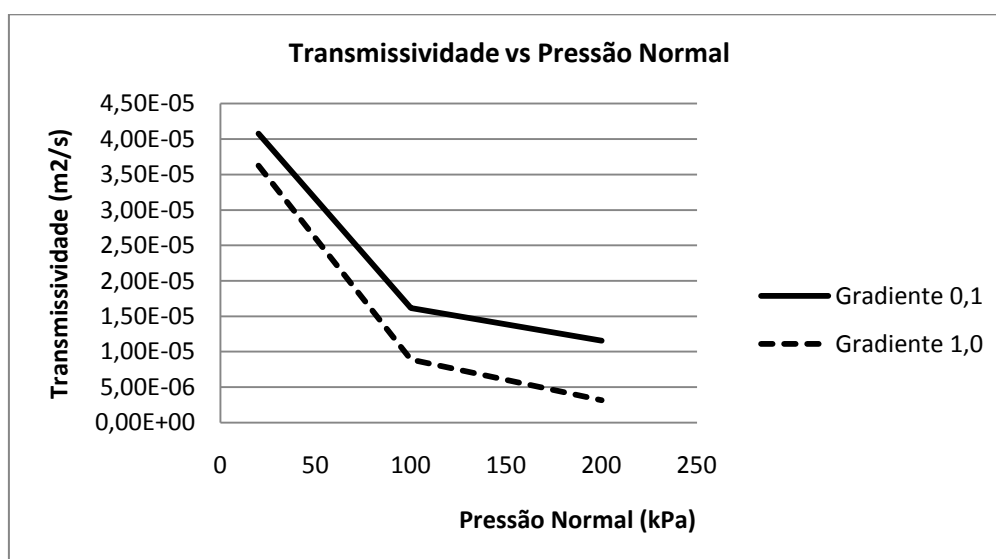


Figura 41. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.

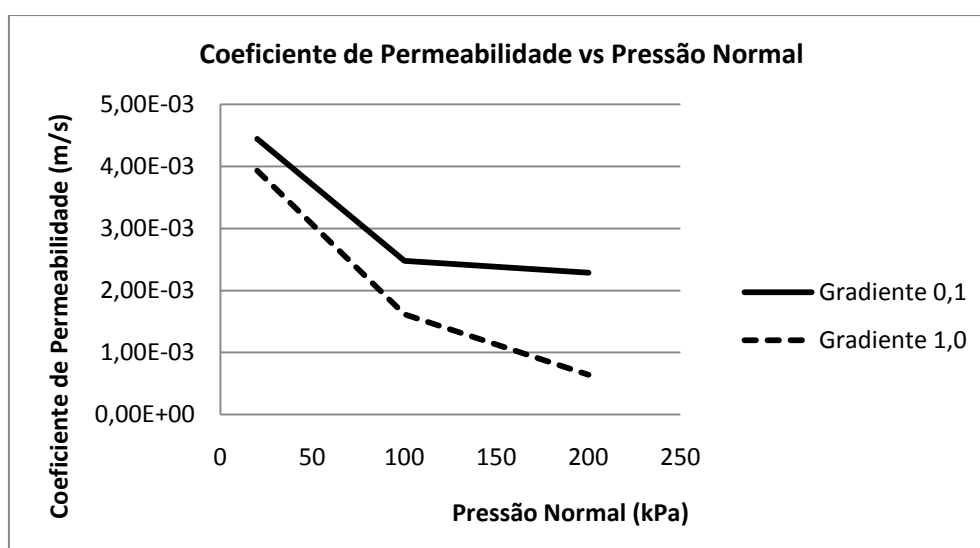


Figura 42. Representação gráfica do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX.

5.2.2.5. Discussão dos resultados

O estudo das características de permeabilidade no plano do material torna-se relevante quando é possível avaliar diferentes parâmetros como sendo o coeficiente hidráulico, a transmissividade e coeficiente de permeabilidade, mas especialmente oportuno quando é possível estimar o efeito que a DDI, a abrasão e o efeito conjunto destes últimos têm

sobre um determinado geossintético. Desta forma, a quantificação e a comparação destes parâmetros, para o geotêxtil GTX, aparece na Tabela 13 e ainda nas Figuras 43 e 44.

Uma das conclusões a assumir mostra, tal como esperado, uma tendência de diminuição dos valores de coeficiente hidráulico com o aumento da pressão de compressão.

Conclui-se ainda que a simulação de qualquer um dos processos de dano considerados provoca um aumento, particularmente para pressões mais baixas, dos valores de coeficiente hidráulico.

Ao analisar o efeito da DDI observa-se nas Figuras 43 e 44 um valor de coeficiente hidráulico bastante superior nos provetes sujeitos a DDI comparativamente com os intactos para uma pressão de 20 kPa. Contudo para os valores de 100 e 200 kPa esta diferença, para ambos os gradientes, torna-se pouco relevante. Quando se dá a aplicação de pressões mais elevadas os provetes já se encontram submetidos a fluxos de água, que provocam um processo de lavagem e remoção de partículas de *corundum* mais pequenas incrustadas na superfície do geossintético. Associado a este efeito, para pressões mais baixas, a presença de partículas de *corundum* podem contribuir para a criação de caminhos preferenciais de escoamento, ao invés que, para pressões mais elevadas, as partículas deixam de ser catalisadoras para servirem de barreira à passagem da água através dos provetes.

Os danos causados pelo processo de abrasão, para ambos os gradientes utilizados, revelam, por comparação com os provetes intactos, um aumento do coeficiente hidráulico, por desagregação da superfície dos provetes e separação de alguns filamentos. Por comparação com o processo de DDI, a simulação do efeito de abrasão contribui, para pressões mais elevadas, com um aumento maior do coeficiente hidráulico, que poderá ter como explicação, em parte, a danificação uniforme de toda a extensão dos provetes.

Da análise dos gráficos das Figura 43 e 44, torna-se evidente que o efeito conjunto dos processos de DDI e abrasão é aquele que mais contribui para o aumento do coeficiente hidráulico para ambos os gradientes utilizados. A existência, em simultâneo, de partículas de *corundum* incrustadas, mesmo que em menor quantidade depois do processo de abrasão, e da desagregação e alinhamento de filamentos na superfície dos provetes favorecem o escoamento da água.

Tabela 13. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente hidráulico para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Valor Médio	Provetes	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$					
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
	Intacto	1,50E-06	1,14E-05	7,34E-07	3,90E-06	4,55E-07	2,19E-06
Valor Médio	DDI	4,80E-06	3,27E-05	8,11E-07	3,45E-06	8,66E-07	1,29E-06
	Abrasão	3,59E-06	2,41E-05	1,39E-06	6,63E-06	9,95E-07	2,35E-06
	DDI + Abrasão	4,08E-06	3,63E-05	1,62E-06	8,89E-06	1,16E-06	3,15E-06

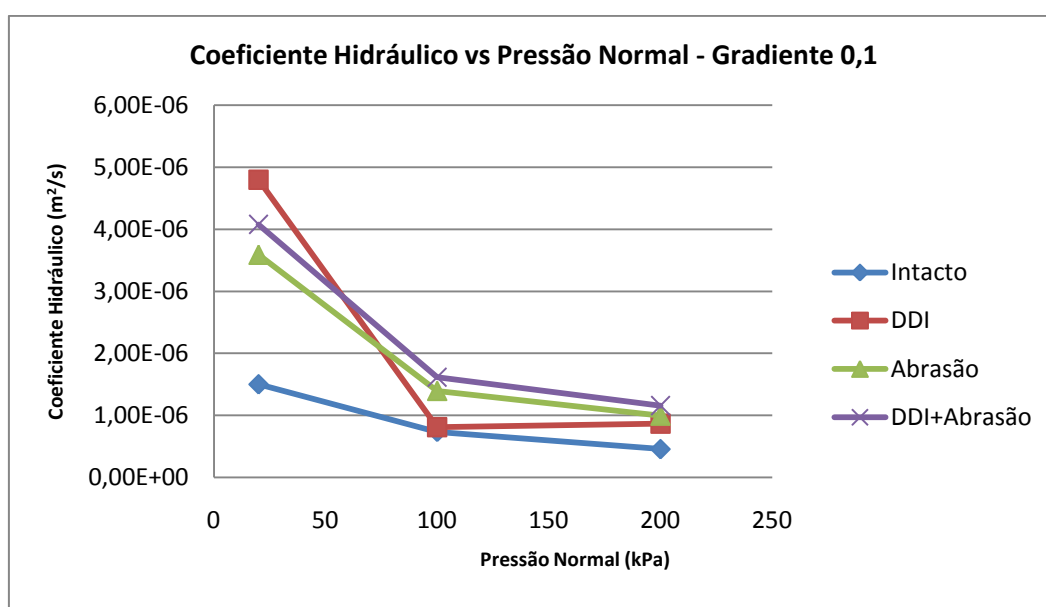


Figura 43. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.

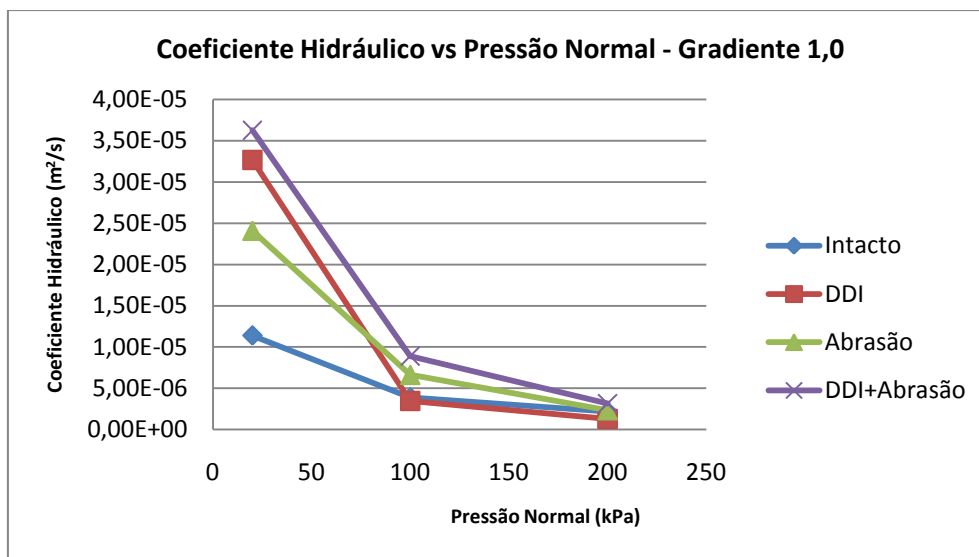


Figura 44. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.

O resumo dos resultados para a transmissividade está de acordo com as conclusões apresentadas anteriormente para coeficiente hidráulico. Fica então a síntese dos valores obtidos para os provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e ao efeito conjunto destes últimos, na Tabela 14 e nos gráficos das Figura 45 e 46.

Tabela 14. Quadro resumo dos valores médios da transmissividade para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Valor Médio	Provetes	Transmissividade θ (m²/s)					
		$\theta_{20/0,1}$	$\theta_{20/1,0}$	$\theta_{100/0,1}$	$\theta_{100/1,0}$	$\theta_{200/0,1}$	$\theta_{200/1,0}$
	Intacto	1,50E-05	1,14E-05	7,34E-06	3,90E-06	4,55E-06	2,19E-06
	DDI	4,80E-05	3,27E-05	8,11E-06	3,45E-06	8,66E-06	1,29E-06
	Abrasão	3,59E-05	2,41E-05	1,39E-05	6,63E-06	9,95E-06	2,35E-06
	DDI + Abrasão	4,08E-05	3,63E-05	1,62E-05	8,89E-06	1,16E-05	3,15E-06

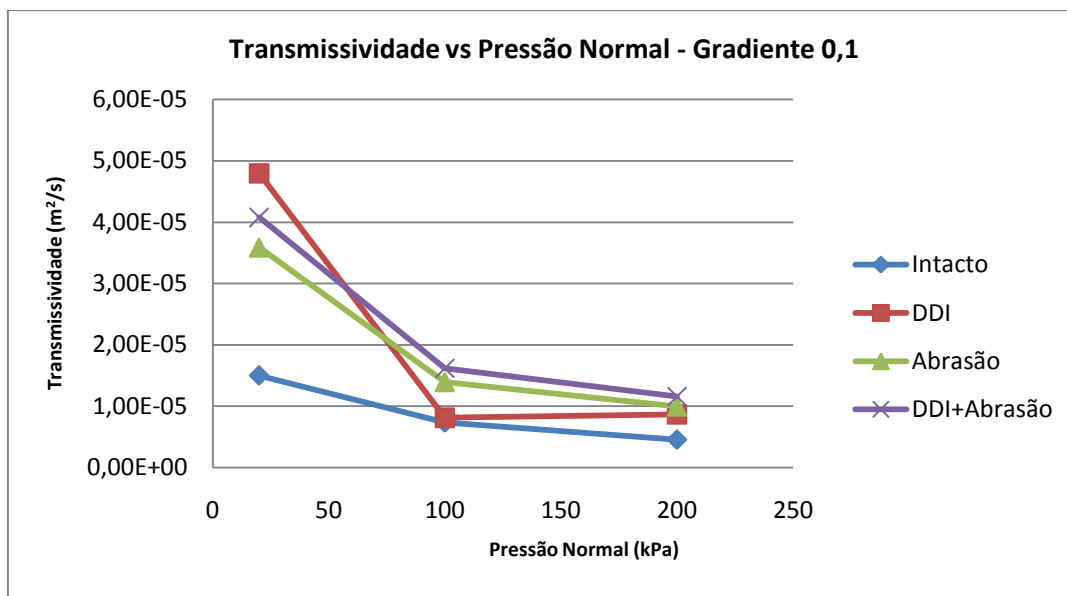


Figura 45. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.

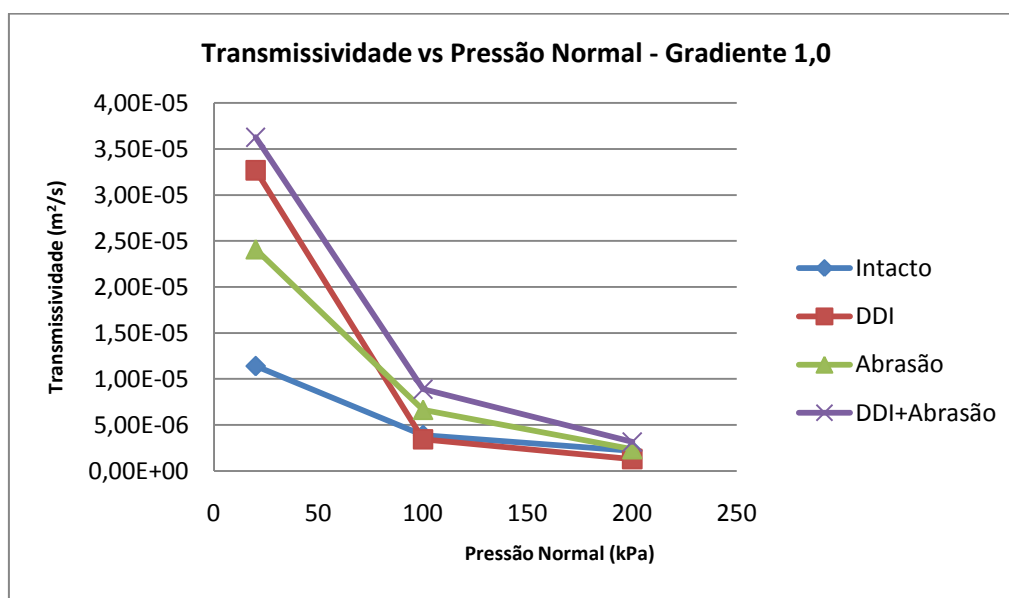


Figura 46. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.

O coeficiente de permeabilidade como se pode observar pela Tabela 15 pelos gráficos das Figura 47 e 48 é particularmente sensível para pressões mais baixas, em que a diferença entre os provetes intactos e submetidos a qualquer tipo de danificação é mais

acentuada. É notório que qualquer tipo de danificação provoca um aumento do coeficiente de permeabilidade, contudo, não é obvio qual dos processos de danificação afecta mais este parâmetro. Mesmo assim é possível concluir que a simulação da abrasão, de forma isolada ou em conjunto com o processo de DDI é aquela que mais contribui para um aumento da velocidade com que a água atravessa os provetes.

Tabela 15. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente de permeabilidade para provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Valor Médio	Provetes	Coeficiente de Permeabilidade k_p (m/s)					
		$k_{p20/0,1}$	$k_{p20/1,0}$	$k_{GTX/0,1}$	$k_{GTX/1,0}$	$k_{p200/0,1}$	$k_{p200/1,0}$
	Intacto	1,19E-03	9,10E-04	8,92E-04	5,02E-04	7,65E-04	3,87E-04
	DDI	5,11E-03	3,55E-03	1,24E-03	6,44E-04	1,72E-03	2,63E-04
	Abrasão	5,46E-03	3,72E-03	2,75E-03	1,37E-03	2,41E-03	5,99E-04
	DDI + Abrasão	4,45E-03	3,93E-03	2,48E-03	1,61E-03	2,29E-03	6,39E-04

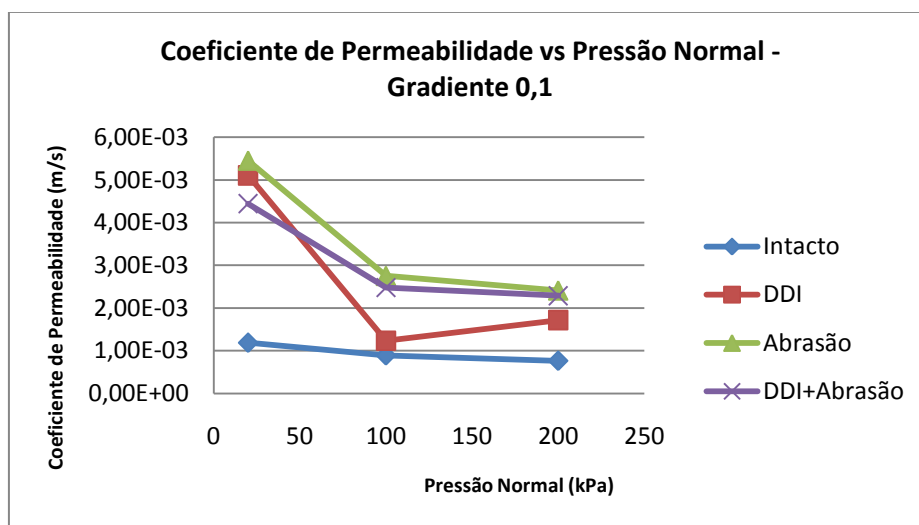


Figura 47. Comparação do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 0,1.

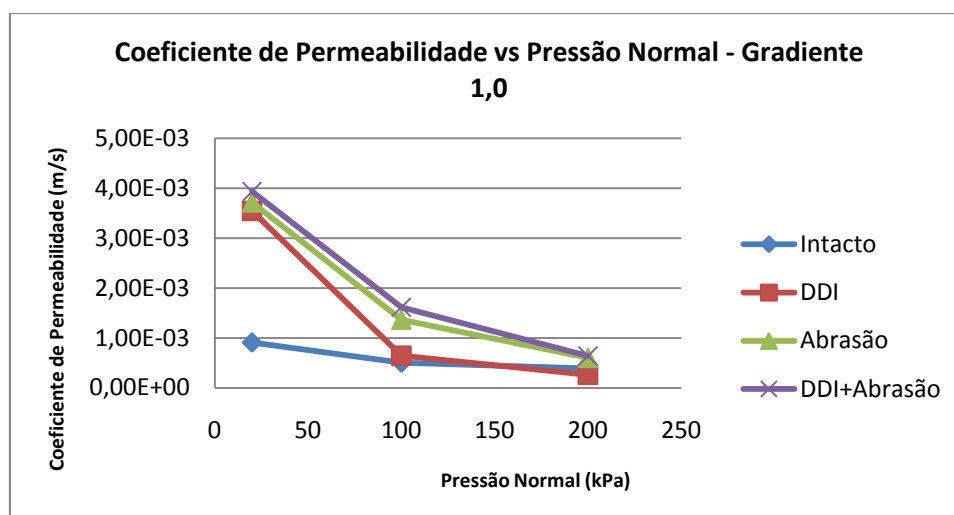


Figura 48. Comparação do coeficiente de permeabilidade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geotêxtil GTX para um gradiente hidráulico de 1,0.

5.2.3. Geocompósito GCR

5.2.3.1. Provetes intactos

Acerca do geocompósito GCR é importante, antes de mais, referir que as amostras deste geossintético apresentam uma espessura bastante reduzida, na ordem dos 2 mm. Este facto, associado à espessura das placas de *neoprene*, torna difícil a avaliação da espessura do material durante os ensaios, principalmente para pressões de compressão mais elevadas, pelo que se considerou apropriado desprezar a quantificação da espessura dos provetes e necessariamente o coeficiente de permeabilidade.

Ainda assim estimaram-se os valores do coeficiente hidráulico e de transmissividade, parâmetros que não dependem da espessura.

Para provetes intactos tem-se então na Tabela 16 os valores obtidos para o coeficiente hidráulico e para a transmissividade. No gráfico da Figura 49 constata-se a diminuição do coeficiente hidráulico com o aumento da pressão, pelo que, para os valores de 100 e 200 kPa verifica-se uma estabilização desta grandeza. A causa para esta situação estará relacionada com a estabilização da área da secção de escoamento de água.

Para os valores de transmissividade, Figura 50, os resultados também apresentam uma diminuição com o aumento da pressão para os dois valores de gradiente utilizados. Considerando que as diferenças são quantitativamente baixas entre leituras de

gradientes diferentes, para este geossintético o valor de perda de carga aplicado não influencia muito a sua capacidade de escoar água. É importante referir que os coeficientes de variação obtidos são demasiado elevados pelo que os resultados não têm validade estatística.

Tabela 16. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR intactos.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOCOMPÓSITO GCR INTACTOS							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}}$ (m^2/s)	valor médio	1,69E-06	8,35E-06	4,26E-07	2,93E-07	5,50E-07	1,67E-07
	c.v (%)	61,53	82,72	25,80	5,73	62,52	26,67
	Δq (%)	79,74		-45,38		-230,25	
Transmissividade θ (m^2/s)	valor médio	1,69E-05	8,35E-06	4,26E-06	2,93E-07	5,50E-06	1,67E-07
	c.v (%)	61,53	82,72	25,80	5,73	62,52	26,67

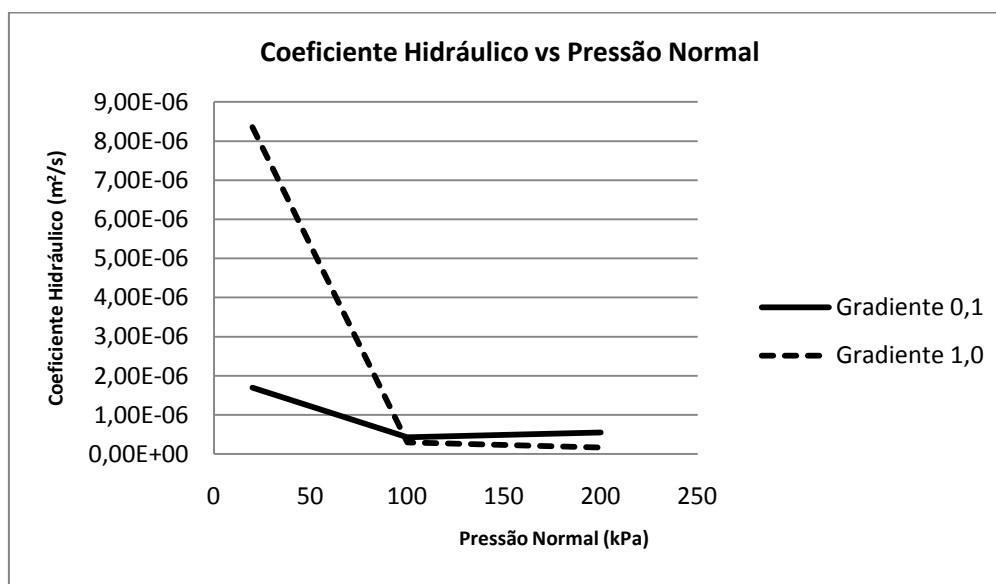


Figura 49. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos do geocompósito GCR.

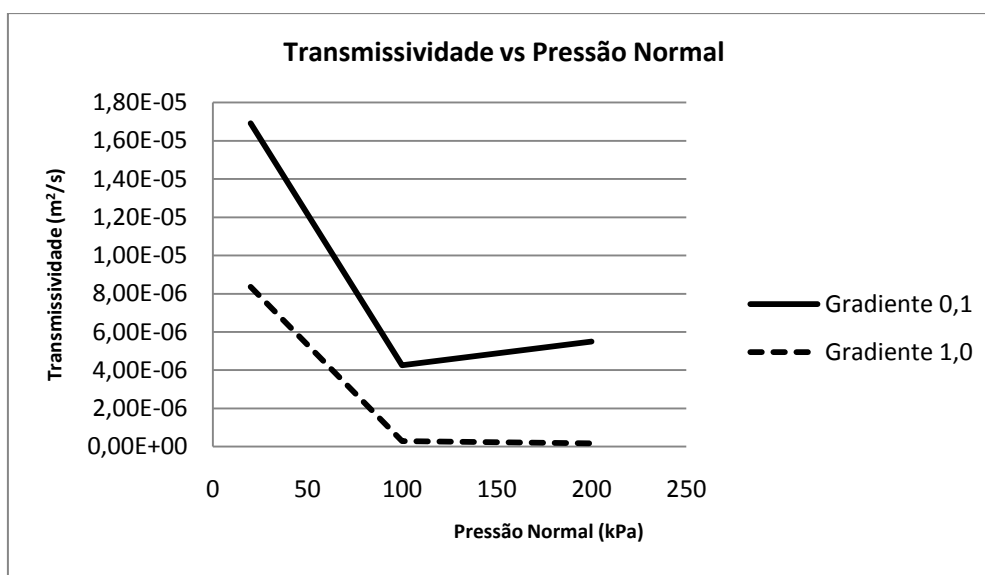


Figura 50. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes intactos do geocompósito GCR.

5.2.3.2. Provetes sujeitos a DDI

Ao observar os provetes após os ensaios de DDI verificou-se a danificação de alguns dos filamentos de PET, nomeadamente o corte e o destacamento localizado dos filamentos da estrutura de geotêxtil, Figura 51. Também foi verificada a incrustação de partículas finas no geotêxtil, resultantes da fragmentação das partículas de *corundum* durante o ensaio de DDI.

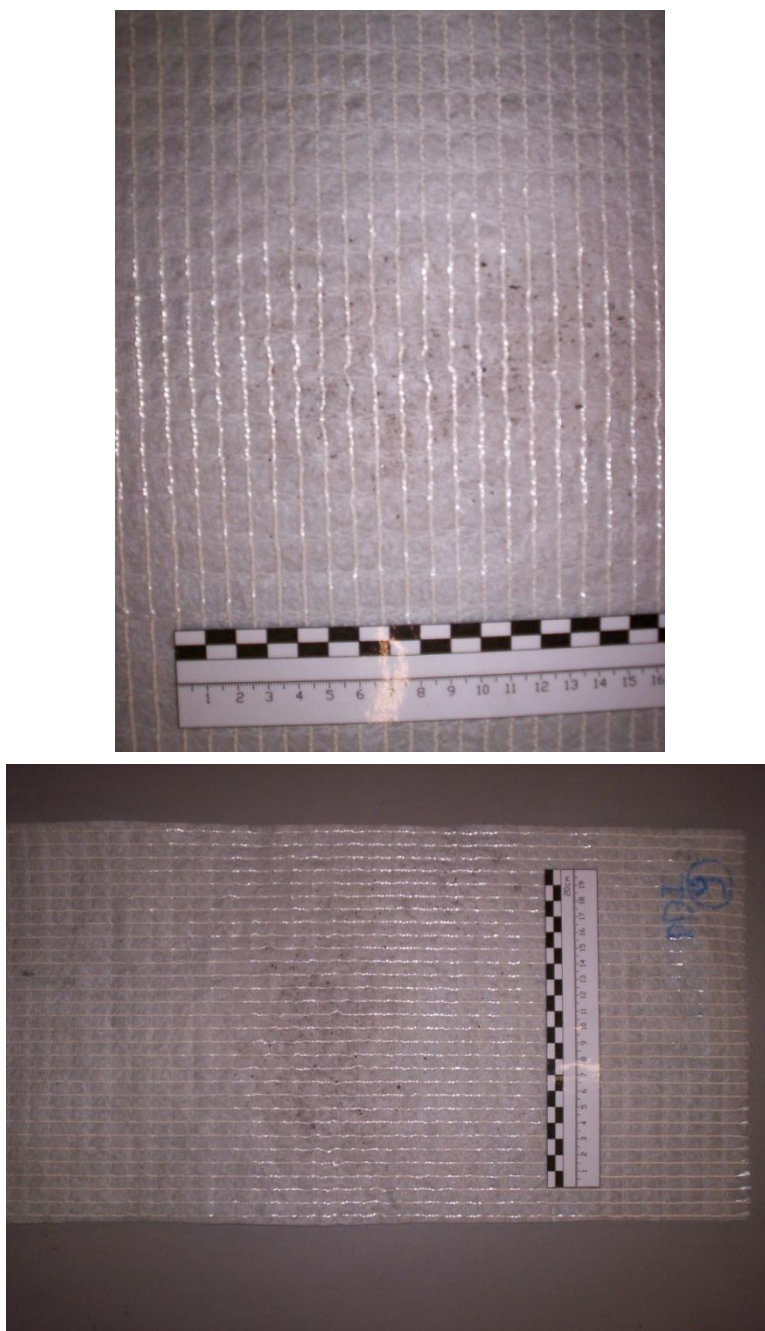


Figura 51. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de DDI em laboratório.

Através dos resultados da Tabela 17 e dos gráficos das Figuras 52 e 53 atesta-se a diminuição do coeficiente hidráulico e da transmissividade com o aumento da pressão. Em relação ao primeiro, os valores para a pressão de 100 e 200 kPa estabilizam, em resultado novamente da estabilização da secção de escoamento. Os coeficientes de variação obtidos são novamente bastante altos comprometendo-se também o rigor estatístico dos resultados.

Tabela 17. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos a DDI.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOCOMPÓSITO GCR SUJEITOS A DDI							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	2,67E-06	1,02E-05	9,92E-07	1,07E-06	8,75E-07	3,72E-07
	c.v (%)	47,11	44,85	41,14	50,21	40,04	45,88
	Δq (%)	73,86		7,32		-135,19	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	2,67E-05	1,02E-05	9,92E-06	1,07E-06	8,75E-06	3,72E-07
	c.v (%)	47,11	44,85	41,14	50,21	40,04	45,88

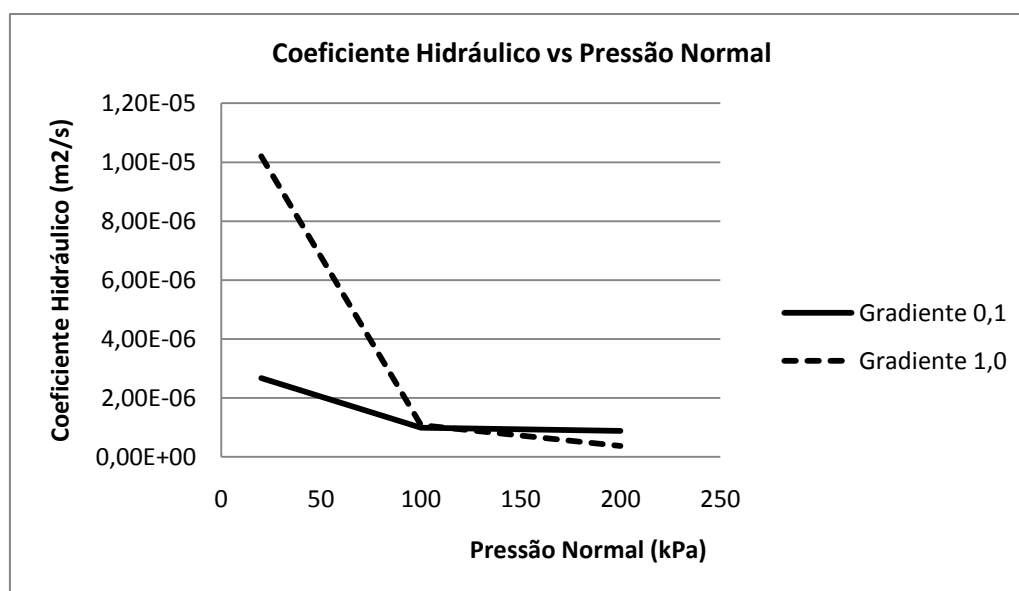


Figura 52. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geocompósito GCR.

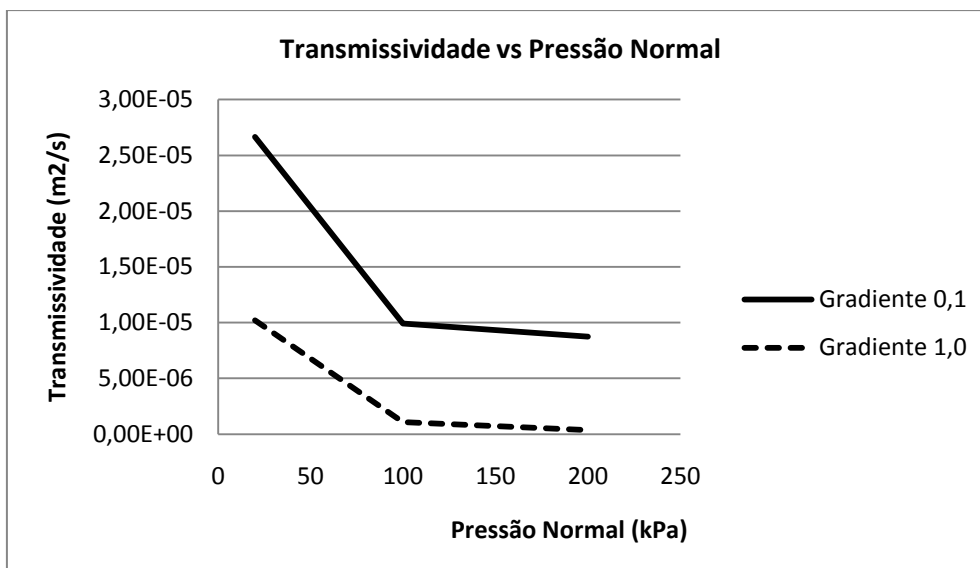


Figura 53. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a DDI do geocompósito GCR.

5.2.3.3. Provetes sujeitos a abrasão

O processo de abrasão induzido ao geocompósito GCR provocou o destacamento de parte dos filamentos de poliéster da estrutura do geotêxtil e a sua danificação. Após a simulação da abrasão, os filamentos, inicialmente “entrelaçados”, separam-se parcialmente, Figura 54.

Os provetes intactos utilizados no ensaio da abrasão tinham as seguintes dimensões: 200 mm de largura e 430 mm de comprimento. No final dos ensaios de abrasão constatou-se que a largura dos provetes diminuiu para cerca de 190mm, aproximadamente.



Figura 54. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de abrasão em laboratório.

No que toca aos resultados, Tabela 18, tanto o coeficiente hidráulico como a transmissividade diminuem com o aumento de pressão sendo que, também neste caso, os valores do coeficiente hidráulico estabilizam para as pressões de 100 e 200 kPa, Figuras 55 e 56. A diferença de valores obtidos entre os gradientes de 1,0 e 0,1 são quantitativamente muito baixas. Mai uma vez os resultados obtidos apresentam pouco significado estatístico.

Tabela 18. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos a abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOCOMPÓSITO GCR SUJEITOS A ABRASÃO							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	6,10E-06	3,87E-05	1,10E-06	1,32E-06	7,04E-07	5,08E-07
	c.v (%)	77,47	67,34	98,07	153,55	84,73	143,40
	Δq (%)	84,24		16,62		-38,80	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	6,10E-05	3,87E-05	1,10E-05	1,32E-06	7,04E-06	5,08E-07
	c.v (%)	77,47	67,34	98,07	153,55	84,73	143,40

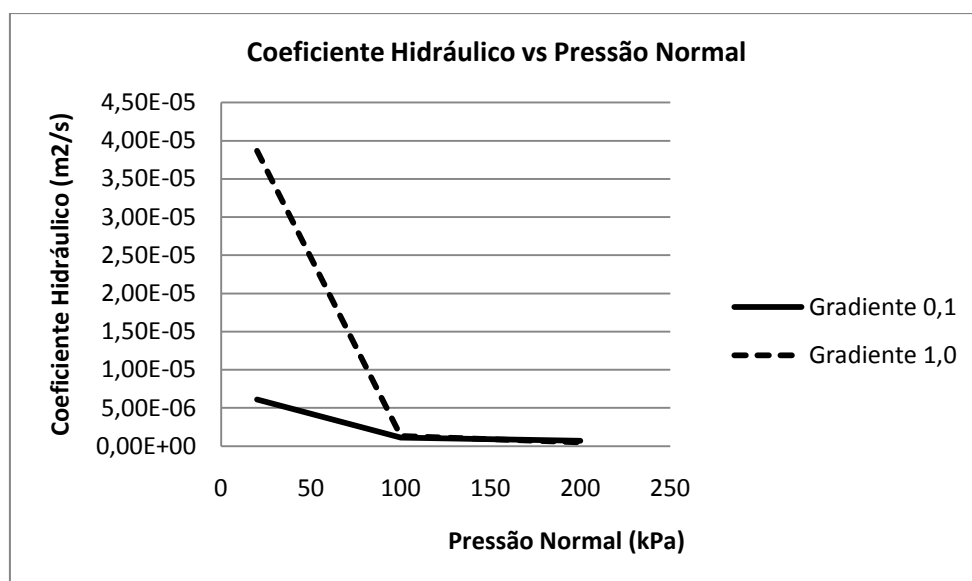


Figura 55. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geocompósito GCR.

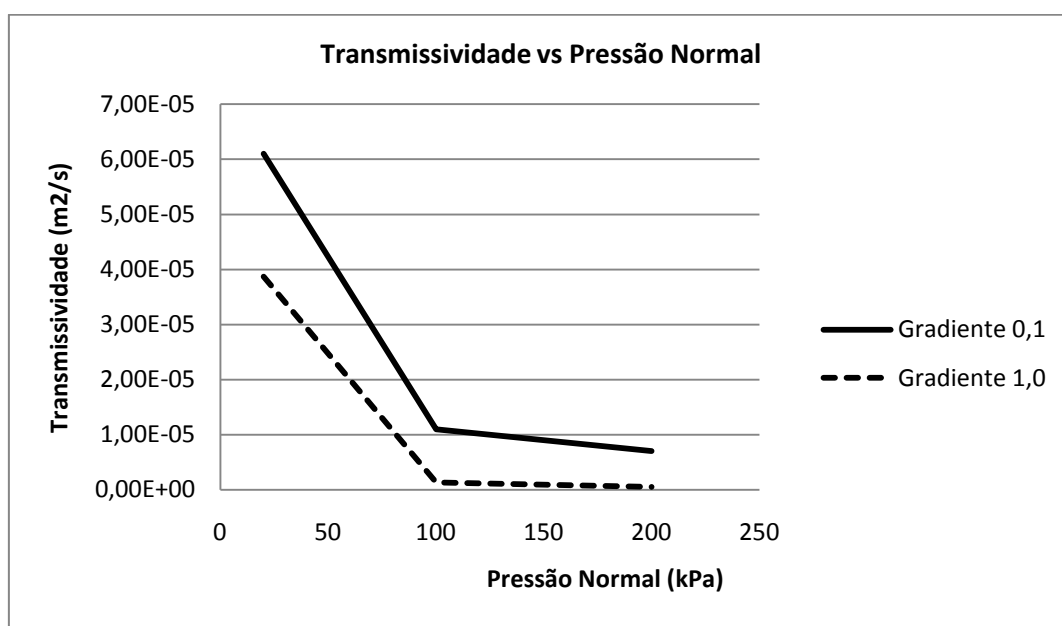


Figura 56. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos a abrasão do geocompósito GCR.

5.2.3.4. Provetes sujeitos ao efeito combinado de DDI e abrasão

Os danos registados após os ensaios de abrasão, nos provetes submetidos previamente a DDI, foram sobretudo o destacamento dos filamentos de PET da estrutura do geotêxtil,

a desagregação superficial dos filamentos de PET e do geotêxtil e ainda o corte, reorientação e alinhamento dos filamentos na direcção do ensaio, Figura 57.

Após os ensaios de abrasão também se verificou uma ligeira contracção lateral dos provetes pelo que a sua largura final era de, aproximadamente, 190 mm.



Figura 57. Aspecto do geocompósito GCR após ensaio de DDI e abrasão em laboratório.

A avaliação do efeito conjunto da DDI e da abrasão revelou a mesma tendência no que toca à diminuição do coeficiente hidráulico e da transmissividade com o aumento da pressão. Revelou ainda a estabilização do coeficiente hidráulico para as pressões de 100 e 200 kPa, pela mesma razão já referida atrás. Os resultados estão apresentados na Tabela 19 e nas Figuras 58 e 59.

Tabela 19. Valores médios e do coeficiente de variação dos coeficiente hidráulico, transmissividade e coeficiente de permeabilidade para provetes do geocompósito GCR sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS - PROVETES DO GEOCOMPÓSITO GCR SUJEITO A DDI+ABRASÃO							
Pressão (kPa) /gradiente (-)		20/0,1	20/1,0	100/0,1	100/1,0	200/0,1	200/1,0
Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$	valor médio	1,62E-06	8,65E-06	5,45E-07	3,90E-07	7,52E-07	2,14E-07
	c.v (%)	44,07	39,50	67,95	1,81	25,40	14,74
	Δq (%)	81,25		-39,67		-251,37	
Transmissividade θ $\text{(m}^2/\text{s)}$	valor médio	1,62E-05	8,65E-06	5,45E-06	3,90E-07	7,52E-06	2,14E-07
	c.v (%)	44,07	39,50	67,95	1,81	25,40	14,74

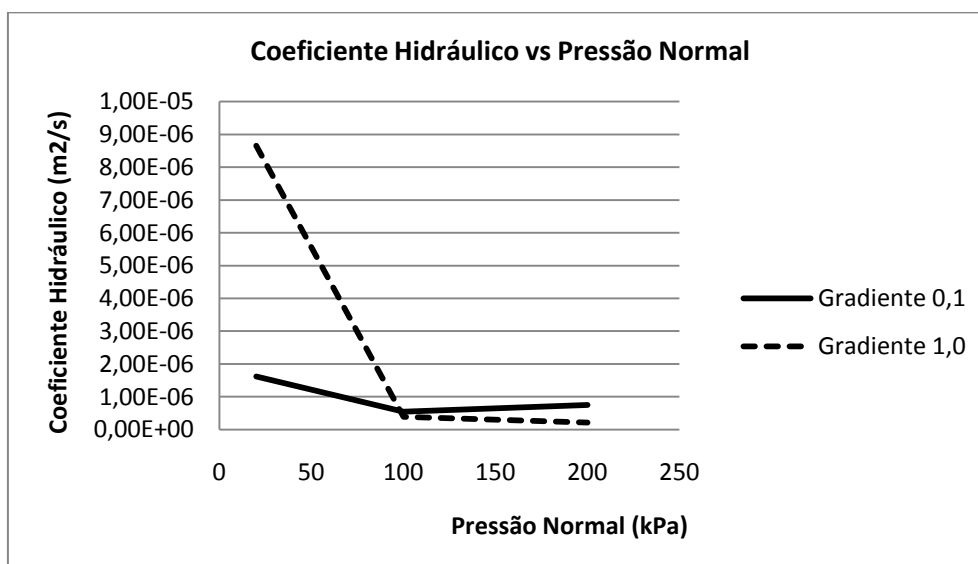


Figura 58. Representação gráfica do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR.

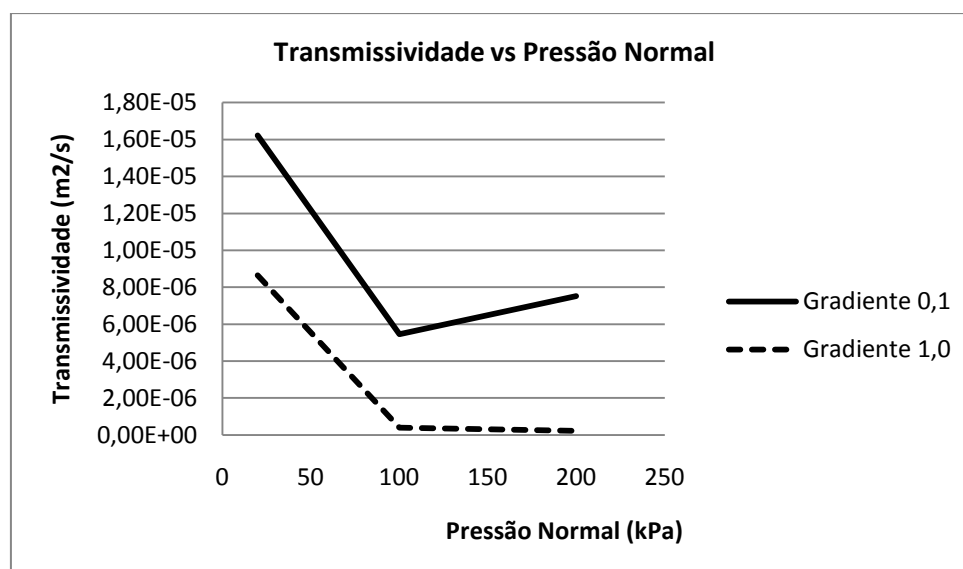


Figura 59. Representação gráfica da transmissividade em função da pressão para provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR.

5.2.3.5. Discussão dos resultados

Para o geocompósito GCR a comparação dos resultados para os diversos valores obtidos, Tabela 20, para os provetes intactos, sujeitos a DDI, a abrasão e ao seu efeito conjunto revela que apenas para o valor de pressão mais baixo se registam diferenças. Este é um traço comum aos dois gradientes utilizados. Portanto tal como já foi referido este facto deve-se à estabilização da secção de escoamento para as pressões de 100 e 200 kPa. Em suma, é possível afirmar que, para pressões superiores a 20 kPa, a influência que a perda de carga e que a pressão de compressão podem ter sobre a capacidade de escoamento do geossintético é bastante reduzida, Figura 60 e 61.

Estas conclusões são válidas para os provetes ensaiados sujeitos a danificação durante a instalação, a abrasão ou mesmo ao seu efeito conjunto pelo que, para pressões mais elevadas, a influência que estes processos de danificação podem ter sobre a permeabilidade no plano do geomcompósito GCR são pouco relevantes.

Ainda que se possam assumir parte das conclusões apresentadas é importante apontar como limitação aos ensaios realizados o facto de os coeficientes de variação registados serem demasiado elevados e não ser possível atribuir validade estatística aos resultados obtidos. A dificuldade na recolha de água, a espessura reduzida do geocompósito, a heterogeneidade das amostras ou mesmo condições de ensaio deficientes podem ser parte da origem da dispersão de valores obtidos.

Tabela 20. Quadro resumo dos valores médios do coeficiente hidráulico para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Valor Médio	Provetes	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{pressão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$					
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
	Intacto	1,69E-06	8,35E-06	4,26E-07	2,93E-07	5,50E-07	1,67E-07
Valor Médio	DDI	2,67E-06	1,02E-05	9,92E-07	1,07E-06	8,75E-07	3,72E-07
	Abrasão	6,10E-06	3,87E-05	1,10E-06	1,32E-06	7,04E-07	5,08E-07
	DDI + Abrasão	1,62E-06	8,65E-06	5,45E-07	3,90E-07	7,52E-07	2,14E-07

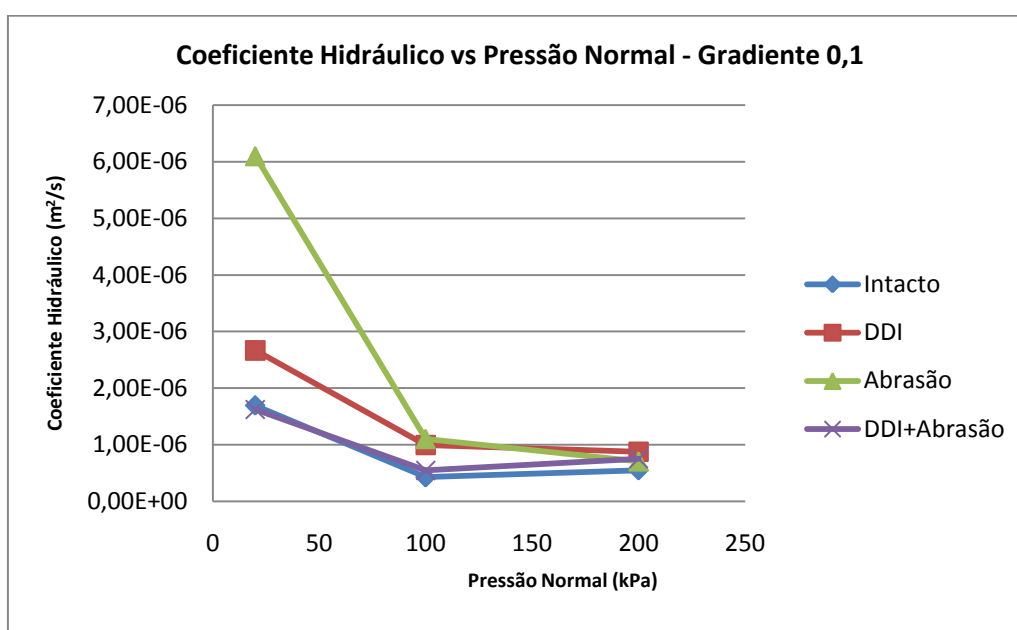


Figura 60. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 0,1.

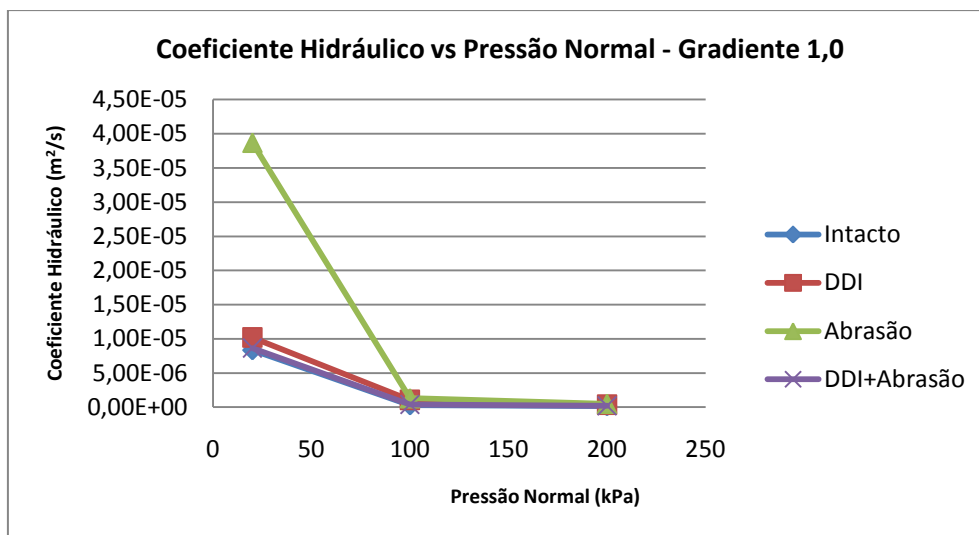


Figura 61. Comparação do coeficiente hidráulico em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 1,0.

Em relação à transmissividade as conclusões apresentadas anteriormente, para o coeficiente hidráulico também são válidas e apropriadas a este caso, Tabela 21 e Figuras 62 e 63.

Tabela 21. Quadro resumo dos valores médios da transmissividade para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Valor Médio	Provetes	Transmissividade θ (m²/s)					
		$\theta_{20/0,1}$	$\theta_{20/1,0}$	$\theta_{100/0,1}$	$\theta_{100/1,0}$	$\theta_{200/0,1}$	$\theta_{200/1,0}$
	Intacto	1,69E-05	8,35E-06	4,26E-06	2,93E-07	5,50E-06	1,67E-07
	DDI	2,67E-05	1,02E-05	9,92E-06	1,07E-06	8,75E-06	3,72E-07
	Abrasão	6,10E-05	3,87E-05	1,10E-05	1,32E-06	7,04E-06	5,08E-07
	DDI + Abrasão	1,62E-05	8,65E-06	5,45E-06	3,90E-07	7,52E-06	2,14E-07

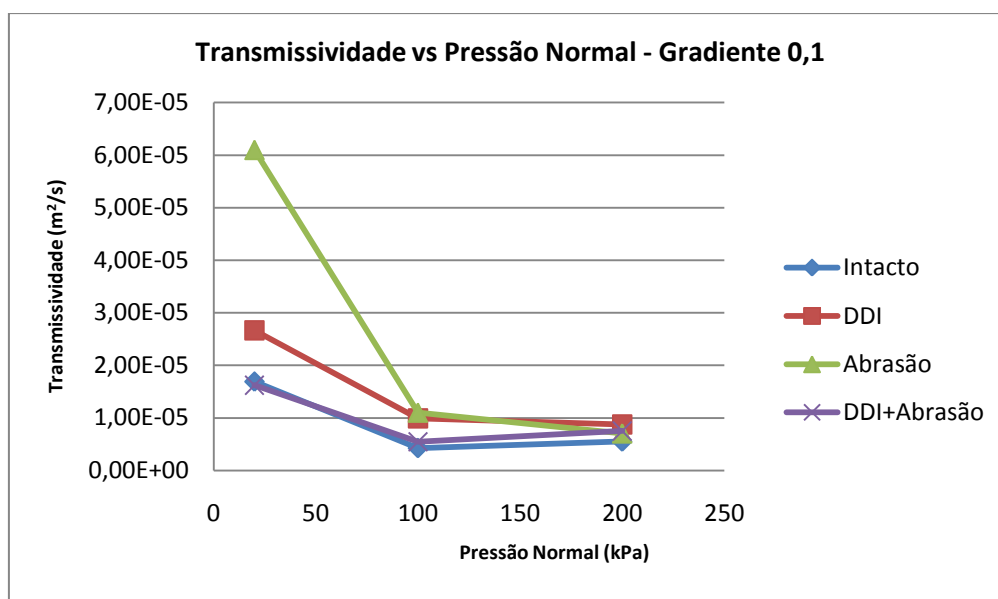


Figura 62. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 0,1.

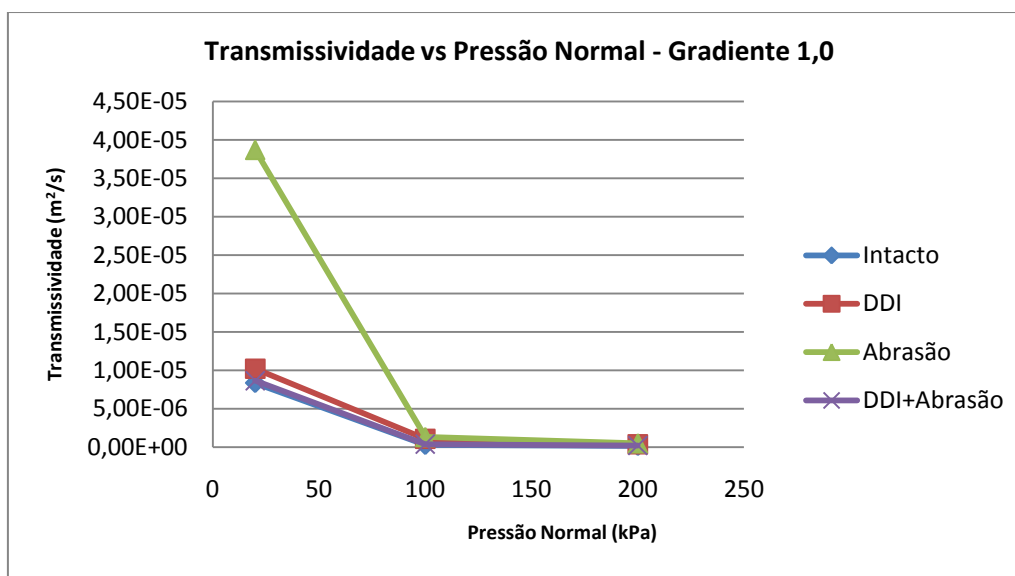


Figura 63. Comparação da transmissividade em função da pressão para provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão do geocompósito GCR para um gradiente hidráulico de 1,0.

5.3. Ensaio de permeabilidade normal ao plano do material

5.3.1. Considerações iniciais

A realização do ensaio de determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano de um geossintético segue os procedimentos descritos no ponto 4.3.2.2. O método indicado permite a avaliação da permeabilidade normal ao plano dos dois geossintéticos em estudo ao incidir na determinação da velocidade de escoamento correspondente a uma perda de carga de 50 mm, VI_{H50} . Permite ainda, como resultado do quociente entre os valores de velocidade e da perda de carga, estimar a permissividade dos materiais. O tratamento dos resultados obtidos envolveu a determinação dos coeficientes de variação para cada grupo de provetes ensaiados.

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados obtidos, dos parâmetros atrás referidos, para provetes do geotêxtil GTX e do geocompósito GCR intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao seu efeito conjunto. Faz-se ainda a representação gráfica dos valores médios da velocidade de escoamento em função da perda de carga para cada grupo de provetes ensaiados e tenta-se perceber de que forma os processos de dano induzidos afectam as características de permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos estudados.

5.3.2. Geotêxtil GTX

Na Figura 64 mostram-se amostras de cada grupo de provetes ensaiados do geotêxtil GTX. Tal como já se fez referência anteriormente, os provetes sujeitos a DDI apresentavam a incrustação de partículas de *corundum* fragmentadas resultantes do método de ensaio. Para os provetes sujeitos a abrasão verificou-se a desagregação da superfície em que os filamentos exteriores são parcialmente desassociados da estrutura que compõe o geotêxtil. E, por último, os provetes sujeitos ao ensaio de abrasão antecidos do ensaio de DDI, em que se observa o alinhamento de filamentos, a desagregação superficial do geotêxtil e o corte de filamentos superficiais.



a)



b)



c)



d)

Figura 64. Exemplos de provetes do geotêxtil GTX: a) intactos; b) sujeitos a DDI; c) sujeitos a abrasão; d) sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Na Tabela 22, apresentam-se os valores médios, para cada grupo de provetes ensaiados, do valor da velocidade de escoamento para os diferentes valores de perda de carga considerados.

Da interpretação do gráfico da Figura 65, percebe-se, como esperado, para todos os grupos de provetes ensaiados, um aumento da velocidade de escoamento proporcional ao aumento da perda de carga. Agora a comparação entre os provetes intactos e os restantes grupos revela que, à excepção dos provetes sujeitos a DDI exclusivamente, o valor de VI_{H50} , ou seja a velocidade de escoamento para uma perda de carga padrão de 50 mm, diminui com a danificação do geotêxtil sendo o grupo de provetes em que se verifica maior redução aquele em que os provetes são sujeitos ao ensaio de abrasão. Seria de esperar inicialmente que a situação que provocasse maior diminuição fosse o efeito conjunto de DDI e abrasão. Contudo isto não se verifica, pois é provável que a presença de partículas na superfície do geotêxtil funcione, por um lado, como barreira adicional à percolação da água, por outro lado, a existência destas partículas de alguma forma compensa o processo de danificação que se criou sobre os provetes. Daí o efeito isolado da DDI não afectar a velocidade de escoamento de forma significativa.

Importa ainda ressaltar que, em relação a este ensaio, a massa de cada provete não foi contabilizada, pelo que, a espessura de cada provete poderá também afectar de forma significativa os valores obtidos. Portanto, explicam-se desta forma, os coeficientes de variação relativamente elevados que se verificaram.

Tabela 22. Quadro resumo dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , do índice de velocidade, VI_{H50} , e da permissividade, ψ , de provetes do geotêxtil GTX, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS - GEOTÊXTIL GTX								
Valor Médio	Provetes	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
		Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹) (Δh=50 mm)
		14	28	42	56	70		
	Intacto	3,219	6,295	9,832	12,871	16,718	11,587	0,232
	c.v (%)	18,9	19,2	15,9	15,9	12,2	15,7	15,7
	DDI	3,356	6,554	9,838	12,799	15,570	11,471	0,229
c.v (%)	18,9	18,2	22,3	21,0	22,6	21,2	21,2	
Abrasão	2,588	4,821	7,351	9,646	11,542	8,566	0,171	
c.v (%)	8,4	17,1	15,0	17,0	14,2	15,1	15,1	
DDI + Abrasão	2,788	5,731	8,826	11,376	13,215	9,187	0,184	
c.v (%)	19,7	18,5	18,2	22,1	23,0	8,5	8,5	

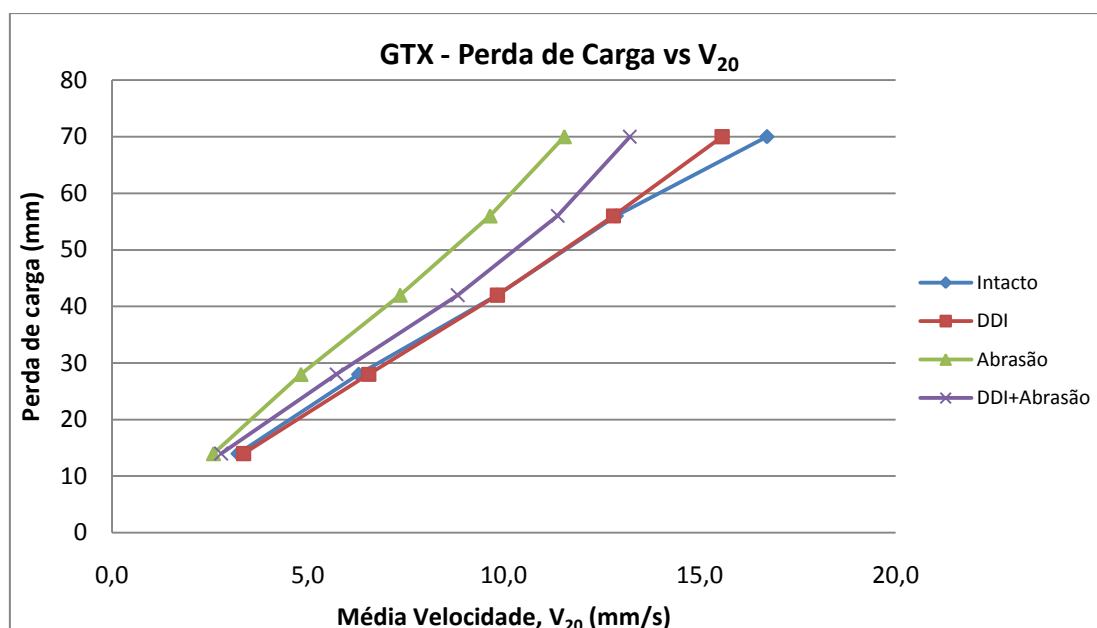
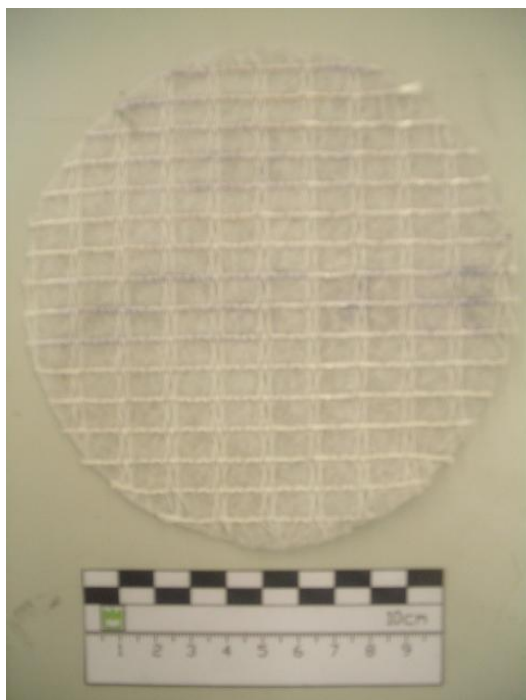


Figura 65. Representação gráfica dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , em função da perda de carga para os provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão, para o geotêxtil GTX.

5.3.3. Geocompósito GCR

Para as amostras do geocompósito, GCR, tal como é visível no gráfico da Figura 68, os processos de danificação a que os provetes foram sujeitos revelaram ser capazes de alterar, significativamente, as características de permeabilidade normal ao plano do material ensaiado.

Tal como é apresentado na Figura 66, após os ensaios de DDI verificou-se a danificação de alguns dos filamentos de PET, nomeadamente o corte e o destacamento localizado dos filamentos da estrutura de geotêxtil e também a incrustação de partículas finas no geotêxtil de base do GCR, resultantes da fragmentação das partículas de *corundum*. Já o processo de abrasão provocou o destacamento de parte dos filamentos de poliéster da estrutura do geotêxtil e a sua danificação, com a separação parcial destes. Após a acção conjunta de DDI e abrasão registou-se o destacamento dos filamentos de PET da estrutura do geotêxtil, a desagregação superficial dos filamentos de PET e do geotêxtil e ainda o corte, reorientação e alinhamento dos filamentos na direcção do ensaio.



a)



b)



c)



d)

Figura 66. Exemplos de provetes do geocompósito GCR: a) intactos; b) sujeitos a DDI; c) sujeitos a abrasão; d) sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

Ao analisar os resultados obtidos, Tabela 23, e a sua representação gráfica, Figura 67, constata-se, globalmente, um aumento da velocidade de escoamento proporcional ao

aumento da perda de carga. Apesar de este ser um facto comum a cada grupo de provetes ensaiados, registam-se diferenças importantes no que toca ao valor de VI_{H50} obtido. Neste caso os processos de danificação influem bastante, à excepção do processo de DDI isoladamente, na permeabilidade normal ao plano do material. A danificação dos provetes por abrasão e, particularmente, o efeito da DDI em conjunto com abrasão faz diminuir a velocidade de escoamento normal ao plano do geocompósito GCR

Em relação ao processo de DDI o facto de parte do material granular ficar incrustado na superfície de contacto e funcionar como barreira à passagem da água pode atenuar o efeito que os cortes e a desagregação da superfície do GCR pode ter sobre as características de permeabilidade. Tem-se ainda que o processo de DDI afecta sobretudo a superfície dos provetes e não atravessa toda a sua espessura. Daí se explicar o porquê do processo de DDI ter pouca influência na permeabilidade normal ao plano do material.

Já a danificação por abrasão desagrega a superfície do GCR e os filamentos de PET sendo que, como este é um geocompósito de reduzida espessura, altera-se a uniformidade do material. Neste caso a velocidade de escoamento é consideravelmente inferior por comparação com os provetes intactos, sendo que este efeito é mais evidente para perdas de carga mais altas.

Agora no que toca à acção conjunta de DDI e abrasão, aquando do processo de abrasão parte das partículas de *corundum* são removidas e algum do efeito de barreira à passagem de água perde-se. Contudo neste caso a danificação provocada aos provetes e a heterogeneidade das suas superfícies explica a redução drástica da velocidade de escoamento.

Os coeficientes de variação para os grupos de provetes ensaiados apresentam-se elevados, porém a heterogeneidade que os processos de danificação induzem sobre os provetes tornam difícil a obtenção de resultados menos dispersos. No entanto, a dispersão de resultados é mais reduzida do que a verificada para alguns dos ensaios para determinação da permeabilidade no plano.

Tabela 23. Quadro resumo dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , do índice de velocidade, VI_{H50} , e da permissividade, ψ , de para provetes do geocompósito GCR, intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão.

RESUMO DE RESULTADOS								
Valor Médio	Provetes	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
		Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
		14	28	42	56	70		(ΔH =50 mm)
	Intacto	15,71	28,89	42,46	58,48	84,65	53,24	1,06
	c.v (%)	15,9	9,8	13,4	8,4	7,7	9,1	9,1
	DDI	16,01	30,27	44,72	60,46	76,80	53,99	1,08
	c.v (%)	43,7	39,4	42,6	36,6	32,9	38,1	38,1
	Abrasão	14,35	28,71	40,25	52,88	60,36	46,80	0,94
	c.v (%)	19,3	7,2	7,1	7,6	10,6	7,6	7,6
	DDI + Abrasão	8,18	16,22	26,17	38,46	55,72	32,39	0,65
	c.v (%)	18,9	19,7	18,4	24,5	34,0	21,6	21,6

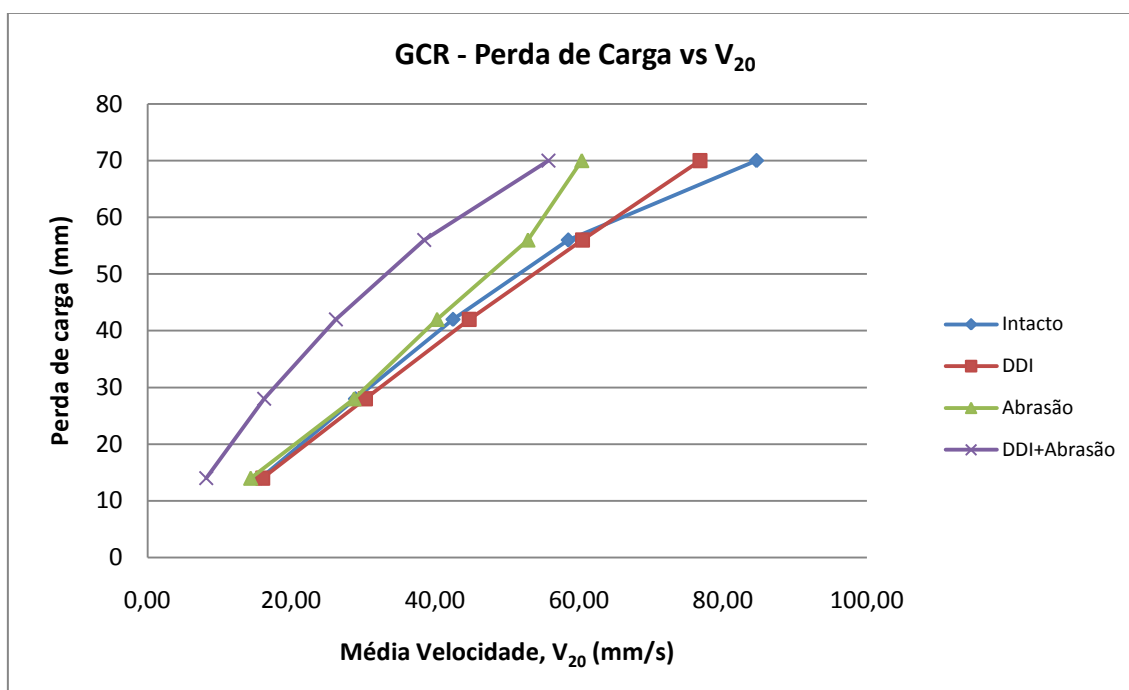


Figura 67. Representação gráfica dos valores médios da velocidade de escoamento, V_{20} , em função da perda de carga para os provetes intactos, sujeitos a DDI, sujeitos a abrasão e sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão, para o geocompósito GCR.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1. Comparação com resultados de outro autor

6.1.1.1. Âmbito

Com a realização de um conjunto de ensaios deste tipo, uma parte fundamental da interpretação dos resultados obtidos passa pela comparação directa com outros trabalhos já realizados, nomeadamente, projectos em que o contexto tenha sido, de igual forma, a avaliação das propriedades hidráulicas dos geossintéticos e de que forma estas são modificadas por processos de danificação. Contudo este exercício torna-se especialmente difícil já que são poucos, ainda, os trabalhos que abordam esta temática e mesmo aqueles que incidem sobre o estudo da permeabilidade no plano e normal ao plano do material tomaram como objecto de estudo geossintéticos de características diferentes dos estudados neste trabalho. Ainda assim é pertinente perceber algumas tendências comuns a vários tipos de geossintéticos e para isso analisa-se o trabalho de Silva (2010) e especificamente no que concerne à danificação induzida aos provetes, o trabalho de Rosete (2010).

6.1.1.2. Rosete (2010)

O trabalho de Rosete (2010), aborda os efeitos da danificação durante a instalação (DDI) e da abrasão, em particular, no comportamento mecânico de curto prazo de alguns geossintéticos. Para tal, o procedimento laboratorial seguido faz referência à escolha de três materiais com diferente estrutura: uma geogrelha extrudida biaxial em polipropileno; um geotêxtil (GTX1) não tecido em polipropileno com massa por unidade de área de 800g/m^2 ; um geocompósito de reforço (GCR1) unidireccional de resistência nominal de 75 kN/m constituído por um geotêxtil não tecido de polipropileno (PP) reforçado por filamentos de poliéster (PET) de elevada resistência.

Os dois últimos geossintéticos, o geotêxtil não tecido e o geocompósito, são materiais da mesma gama de produtos utilizados no presente estudo, inclusivé com designação comercial semelhante, apresentando as mesmas características gerais. Diferem, o geotêxtil GTX, no valor de massa por unidade de área de 1000 g/m^2 e, o geocompósito GCR, no valor de resistência nominal de 55 kN/m .

Em ambos os trabalhos para os geotêxteis (GTX e GTX1) verificou-se:

- a incrustação de partículas de *corundum*, após os ensaios de DDI
- a desagregação superficial dos provetes, após os ensaios de abrasão
- e o alinhamento de filamentos com a desagregação e corte dos filamentos superficiais, após os ensaios, de DDI seguido de abrasão.

Para o geocompósito GCR e GCR1 os provetes após os ensaios de DDI, para além da incrustação de partículas de *corundum*, apresentavam a danificação de alguns filamentos de PET com o corte e destacamento localizado de filamentos da estrutura de geotêxtil. O ensaio de abrasão provocou o destacamento superficial dos filamentos de poliéster da estrutura do geotêxtil de base destes geocompósitos e a sua danificação. Por último, com o efeito conjunto da DDI e abrasão observou-se o destacamento dos filamentos de PET da estrutura do geotêxtil de base, a desagregação superficial dos provetes e a reorientação dos filamentos na direcção do ensaio.

Assim sendo, a comparação dos provetes sujeitos aos processos de DDI, abrasão e ao efeito conjunto de DDI e abrasão, de ambos os trabalhos laboratoriais, permite aferir acerca dos danos provocados aos provetes e concluir que existe uma clara semelhança entre os resultados, de simulação da danificação, para os dois trabalhos. Dado que as grandezas avaliadas nos dois trabalhos são bastantes distintas, opta-se por não fazer qualquer comentário a esse respeito.

6.1.1.3. Silva (2010)

Resta agora encontrar elos de ligação deste trabalho com outros em que a avaliação das propriedades hidráulicas tenha sido relevante.

Para isso aborda-se o trabalho de Silva (2010) já que as actividades laboratoriais compreenderam a realização de ensaios de caracterização em que se avaliaram em provetes intactos e danificados de três geossintéticos: a distribuição e dimensão característica das aberturas; a permeabilidade no plano do geossintético; a permeabilidade normal ao plano do geossintético.

Dos três geossintéticos ensaiados por Silva (2010) apenas um apresenta características idênticas ao geocompósito de reforço GCR, pelo que, é do tipo unidireccional constituído por um geotêxtil não tecido em PP reforçado por filamentos de poliéster (PET) de elevada resistência. De facto, esta autora ensaiou o GCR1, já estudado por Rosete (2010).

Assim sendo, analisam-se de seguida, para os ensaios levados a cabo por Silva (2010) a permeabilidade no plano e normal ao plano deste geocompósito (GCR1) e os resultados

obtidos para provetes intactos e sujeitos a DDI utilizando como material granular também o *corundum* e uma tensão máxima na DDI de 500 kPa. Para além da análise comparam-se, ainda, os resultados obtidos em ambos os trabalhos para os mesmos parâmetros e sob as mesmas condições.

No que toca à avaliação da permeabilidade no plano do material, a Tabela 24 faz a comparação entre os valores do coeficiente hidráulico obtidos neste trabalho com os de Silva (2010). A representação gráfica de parte dos resultados obtidos por Silva (2010) Figura 68, demonstra uma diminuição do coeficiente hidráulico com o aumento da pressão. Mostra ainda que, para a pressão de 20 kPa, a DDI induzida contribui para a diminuição dos valores de coeficiente hidráulico, contudo para pressões de 100 kPa e 200 kPa a sua influência na alteração deste parâmetro torna-se pouco significativa. Ainda para a pressão de 20 kPa, a diferença entre os valores de coeficiente hidráulico para os gradientes de 0,1 e 1,0 é considerável, contudo para os valores de 100 kPa e 200 kPa torna-se irrelevante a diferença entre valores. Estas conclusões são um traço comum aos resultados de ambos os trabalhos.

Tabela 24. Quadro comparativo entre os valores do coeficiente hidráulico para provetes intactos e sujeitos a DDI dos geocompósitos apresentados neste trabalho e por Silva, (2010).

$q_{\text{pressão/gradiente}}$ (m ² /s)	Silva (2010)			Oliveira (2011)		
	Intacto	DDI	Δq (%)	Intacto	DDI	Δq (%)
q20/0,1	2,37E-07	4,51E-07	47,4	1,69E-06	2,67E-06	36,5
q20/1,0	2,16E-06	3,69E-06	41,4	8,35E-06	1,02E-05	18,1
q100/0,1	7,72E-08	7,91E-08	2,3	4,26E-07	9,92E-07	57,1
q100/1,0	2,02E-07	1,52E-07	-32,6	2,93E-07	1,07E-06	72,7
q200/0,1	7,12E-08	7,03E-08	-1,3	5,50E-07	8,75E-07	37,1
q200/1,0	1,03E-07	1,00E-07	-3,0	1,67E-07	3,72E-07	55,2

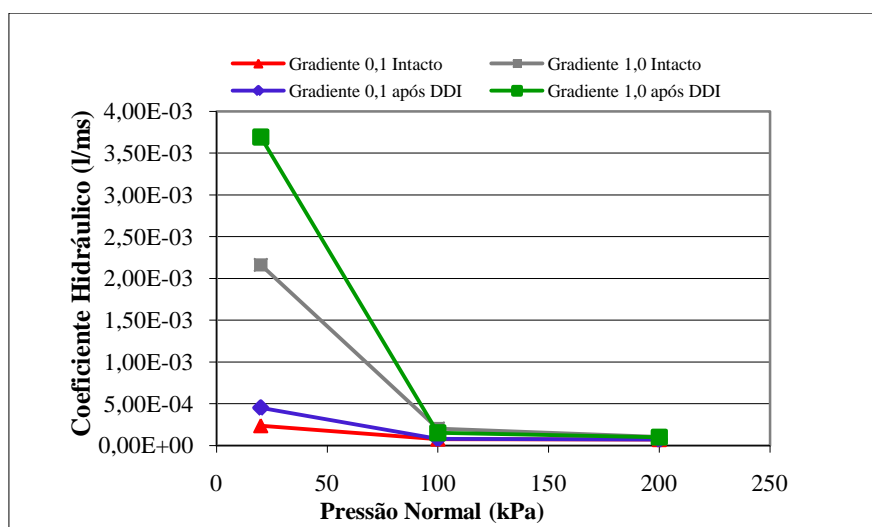


Figura 68. Coeficiente hidráulico em função da pressão normal para provetes intactos e após DDI do geocompósito de reforço, Silva (2010).

Em relação à permeabilidade normal ao plano do material existem também aspectos comuns. Veja-se que, em ambos os trabalhos, os valores para provetes intactos da permeabilidade normal ao plano são inferiores aos nominais e que o efeito da DDI pouco altera o índice de velocidade. Se nos resultados referidos por Silva (2010) ainda existe um aumento ligeiro deste parâmetro e dos valores de permissividade por efeito da DDI, neste trabalho os valores obtidos para provetes intactos e sujeitos a DDI, das referidas grandezas, mantêm-se praticamente iguais, como se pode verificar na Tabela 24.

Tabela 25. Quadro comparativo entre os valores médios da velocidade de escoamento para provetes intactos e sujeitos a DDI dos geocompósitos apresentados neste trabalho e por Silva, (2010).

Valores interpolados (50 mm)						
Proвете	VI _{H50} (mm/s)					
	Intactos	DDI	ΔVI _{H50}	Intactos	DDI	ΔVI _{H50}
	Silva (2010)			Oliveira (2011)		
Média	56,21	58,78	4,38	53,24	53,99	1,39
Desvio Padrão	15,36	8,09		4,87	20,58	
CV (%)	27,33	13,76		9,15	38,12	

6.2. Coeficientes de segurança parciais

No dimensionamento de estruturas com geossintéticos, para representar o efeito dos diferentes agentes de degradação destes materiais, recorre-se a coeficientes parciais de segurança (Pinho-Lopes e Lopes). Assim, neste caso, podem ser definidos coeficientes de segurança parciais para considerar o efeito dos processos de danificação (CS_{DDI}), comparando o valor de uma dada propriedade do material intacto ($X_{intacto}$) com o valor correspondente após danificação ($X_{danificado}$), de acordo com a expressão (6.1).

$$CS_{DDI} = \frac{X_{intacto}}{X_{danificado}} \quad (6.1)$$

Em geral, para proceder ao dimensionamento de geossintéticos considera-se que o valor de cálculo das suas propriedades pode ser definido com o valor último dessa propriedade afectado por coeficientes de segurança parciais que representam os agentes relativos à durabilidade dos materiais relevantes para a aplicação em causa. Este tipo de formulação é usado sobretudo para avaliar propriedades mecânicas, que sofrem reduções por acção de vários agentes. Nesses casos, é comum designar os coeficientes de segurança parciais por coeficientes de redução.

Contudo, a avaliação do efeito que os processos de danificação têm sobre as propriedades hidráulicas dos geossintéticos é um pouco distinta. Quanto à avaliação da permeabilidade, dependendo do tipo de geossintético a avaliar, não é tão óbvio se haverá um aumento ou uma diminuição das propriedades hidráulicas, como é perceptível na Tabela 24, onde são apresentados os coeficientes determinados a partir do programa de ensaios levados a cabo neste trabalho. Assim, para estes casos faz sentido falar num coeficiente de redução inferior à unidade que, ao contrário do que seria de esperar de um coeficiente de segurança tradicional, não provoca uma diminuição do valor da propriedade mas sim um aumento. Por esta razão, neste trabalho os coeficientes que representam o efeito da DDI, da abrasão e da DDI seguida de abrasão são designados por coeficientes de segurança parciais (como alternativa à designação comum de coeficientes de redução).

Em relação ao ensaio de permeabilidade no plano, ao considerar as médias dos valores obtidos para os coeficientes de segurança parciais, após DDI, após abrasão e após o efeito conjunto de DDI e abrasão verifica-se que, globalmente, a quantidade de água

que percolou através dos provetes danificados foi superior à quantidade de água que atravessou os provetes intactos. Ainda assim, a análise isolada destes resultados por geossintético, por pressão de compressão aplicada e por gradiente hidráulico considerado, revela uma gama de coeficientes muito alargada. Portanto, encontrar valores padrão que possam assegurar um dimensionamento conservativo de geossintéticos parece ser uma ideia difícil de ser posta em prática. Concluir mais acerca deste tema, do ponto de vista deste trabalho, carece da realização de um vasto número de ensaios, agrupando os resultados obtidos por tipos de geossintéticos a testar e por efeitos de danificação induzidos.

Já em relação aos coeficientes de segurança obtidos para o ensaio de permeabilidade normal ao plano do material os valores são mais uniformes. Os coeficientes de segurança para a simulação do efeito da DDI de 1,01 e 0,99, para o geotêxtil GTX e para o geocompósito GTR, respectivamente, revelam que é reduzido o efeito que a danificação durante o processo de instalação pode ter sobre estes materiais no que concerne à permeabilidade normal.

A danificação por abrasão já tem um efeito mais significativo, particularmente para o geotêxtil GTX uma vez que o coeficiente de segurança se fixa em 1,35. Para o geocompósito GCR o valor obtido é de 1,14.

O efeito conjunto da DDI e abrasão, tal como esperado, é a situação que provoca maior redução da velocidade de escoamento. Neste caso, tem-se um coeficiente de 1,26 para o GTX e 1,64 para o GCR. Atendendo à aplicabilidade prática destes materiais, é a este domínio que se deve atribuir maior importância, uma vez que em condições reais de utilização a simulação conjunta de DDI e abrasão, além de ser a mais conservativa, é aquela que melhor traduz os processos de danificação a que estes materiais podem estar sujeitos em aplicações de vias-férreas.

Tabela 26. Coeficientes de segurança parciais obtidos neste trabalho

		Ensaio de permeabilidade no plano						Média	Ensaio de permeabilidade normal ao plano
		Transmissividade							
		20 kPa		100 kPa		200 kPa			
		i=0,1	i=1,0	i=0,1	i=1,0	i=0,1	i=1,0		Permissividade
CS _{DDI} (%)	GTX	0,31	0,35	0,91	1,13	0,53	1,70	0,82	1,01
	GCR	0,63	0,82	0,43	0,27	0,63	0,45	0,54	0,99
CS _{ABR} (%)	GTX	0,42	0,47	0,53	0,59	0,46	0,93	0,57	1,35
	GCR	0,28	0,22	0,39	0,22	0,78	0,33	0,37	1,14
CS _{DDI+ABR} (%)	GTX	0,37	0,31	0,45	0,44	0,39	0,70	0,44	1,26
	GCR	1,04	0,97	0,78	0,75	0,73	0,78	0,84	1,64

6.3. Análise ao trabalho laboratorial desenvolvido

Com este trabalho pretendeu-se perceber parte das propriedades hidráulicas de dois geossintéticos, nomeadamente entender de que forma os processos de danificação por DDI e abrasão contribuem para a alteração da permeabilidade no plano e normal ao plano dos geossintéticos.

A caracterização dos danos induzidos foi avaliada através do comportamento hidráulico dos geossintéticos GTX e GCR, tendo como referência os valores obtidos para o material intacto. Com estes resultados foi possível determinar coeficientes de segurança parciais que podem ser indicadores a aplicar no dimensionamento dos geossintéticos estudados.

Embora a estimativa dos coeficientes de segurança seja uma parte da conclusão deste trabalho, importa resumir alguns aspectos que já foram referidos anteriormente e transpô-los em conclusões de carácter geral., ainda que se deixe claras algumas críticas e limitações do trabalho laboratorial desenvolvido.

Assim, com base nos resultados obtidos apresentam-se as seguintes conclusões:

- Para o ensaio de permeabilidade no plano do material verifica-se para os dois geossintéticos uma diminuição dos valores do coeficiente hidráulico com o aumento da pressão de compressão em resultado directo da redução da secção de escoamento;
- Ainda para este ensaio, para o geotêxtil GTX, para uma pressão de compressão de 20 kPa é significativo o aumento do coeficiente hidráulico dos provetes

danificados comparativamente com os provetes intactos, para pressões de 100 kPa e 200 kPa as diferenças tornam-se quantitativamente muito pequenas, ainda que o efeito conjunto de DDI e abrasão seja aquele que mais contribui para o aumento do coeficiente hidráulico;

- Para o geocompósito GCR os resultados do ensaio de permeabilidade no plano revelam que para pressões superiores a 20 kPa a influência dos processos de danificação, da perda de carga e da pressão de compressão sobre a capacidade de escoamento é bastante reduzida; Os elevados valores de coeficientes de variação registados impossibilitam que os resultados obtidos se possam considerar estatisticamente válidos.
- Para o ensaio de permeabilidade no plano umas das críticas a apontar prende-se com a utilização das mesmas esponjas para todos os provetes ensaiados, uma vez que, com a sucessiva aplicação das forças de compressão ocorre a redução de espessura e a degradação da sua superfície; Seria recomendável a utilização de esponjas novas para cada provete ensaiado e a medição da sua espessura, submetido às várias pressões, no início e no final de cada ensaio;
- Para os ensaios de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil GTX verifica-se que os processos de danificação provocam uma diminuição da velocidade de escoamento, sendo que o grupo de provetes em que se verifica uma maior redução é aquele em que os provetes são sujeitos a abrasão unicamente;
- A anterior conclusão é válida também para o geocompósito GCR, ainda que neste caso o processo de danificação que provoca maior redução seja o efeito conjunto de DDI e abrasão;
- O aumento do número de provetes ensaiados, para ambos os tipos de geossintéticos estudados e para ambos os ensaios de permeabilidade realizados, pode contribuir para melhorar o rigor dos resultados e para a diminuição dos coeficientes de variação;
- Um dos condicionalismos ao trabalho laboratorial desenvolvido está relacionado com a avaliação da temperatura da água, tendo-se considerado, na ausência de termómetro, uma temperatura de 20 °C para os provetes de GTX e GCR intactos submetidos ao ensaio de permeabilidade no plano do material, e para os provetes de GTX e GCR intactos e sujeitos a DDI sujeitos ao ensaio de permeabilidade

normal; Ainda que a temperatura seja um factor importante não foi possível a repetição destes ensaios por limitações de tempo;

- A escolha das amostras a ensaiar deve optar por ser tão homogénea quanto possível e fica aqui a sugestão de se quantificar a massa de cada provete e escolher para ensaio um grupo de provetes que apresentem uma massa específica muito semelhante. ainda que existam materiais que exibam uma grande heterogeneidade;

7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho foi possível avaliar as propriedades hidráulicas de dois geossintéticos de diferentes tipos e perceber de que forma os processos de danificação influem na alteração dessas mesmas propriedades. Ainda que os processos de danificação resultem de métodos simplificados de simulação das condições reais de utilização, estes apresentam algumas limitações em recriar a interacção dos materiais naturais com os geossintéticos. Para este facto contribui tanto a escala dos ensaios, como a diversidade de aplicações que os geossintéticos podem ter.

Contextualizando, então, o uso de geossintéticos às aplicações ferroviárias seria interessante a construção de um equipamento que reproduzisse, à escala real, o impacto que o tráfego ferroviário pode ter sobre os geossintéticos e simular dessa forma, com um só ensaio, quase todos os processos de danificação que podem afectar as características deste materiais.

Para além da aproximação dos ensaios às condições reais de utilização seria também pertinente avançar para a realização de um grande número de ensaios, por grupos e tipos de geossintéticos, para avaliação das propriedades hidráulicas e de que forma estas podem ser afectadas por processos de danificação. O objectivo seria tentar estimar, para cada família de geossintético, coeficientes de segurança gerais, associados às propriedades hidráulicas, a considerar no dimensionamento. Ainda que complexa fica a sugestão de abordar a segurança no dimensionamento de geossintéticos do ponto de vista probabilístico considerando os riscos, os efeitos e a probabilidade de ocorrência.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aursudkij, B. (2007). "A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance." Doctor, The University of Nottingham.
- Barret, J. R. (1996). "Use of plastic filters in coastal structures. ." *10 th Int. Conf. on Coastal Engineering* Tokyo, 1048-1067.
- Bathurst, R. J. (2010). "Geosynthetics Functions." International Geosynthetics Society.
- Beckam, W. K., and Mills, W. H. (1935). "Cotton - fabric-reinforced roads. Engineering News Record." 453-455.
- EN 963:1995 "Geotextiles and geotextile-related products. Sampling and preparation of test specimens ".
- EN ISO 10318: 2005 "Geossintéticos. Termos e definições."
- Ferreira Gomes, L. M. (2001). "Geotêxteis e as suas Aplicações." *A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação*, U. d. B. Interior, ed.Covilhã.
- Gicot, O., and Perfetti, J. (1982). "Geotextiles: Conceiving and Designing Engineering Structures."
- Ingold, T. S. (1994). *The geotextiles and geomembranes manual*, Elsevier Advanced Technology.
- ISO 554: 1976 "Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications."
- ISO/FDIS 10722: 2007(E) "Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material."
- Lopes, M. L. (2009). "Utilização de Geossintéticos em Estruturas de Vias-Férreas." *3º Seminário Português sobre Geossintéticos Palestra CD-ROM ISEN-978-989-96466-0-5 pp.19*, Actas do 3º Seminário Português sobre Geossintéticos ISBN-978-898-96466-1-2 pp. 22-4, ed.Coimbra.

Moreira, S. P. d. C. N. M. (2009). "Efeitos da danificação menânica de geossintéticos no comportamento como filtro em sistemas de cobertura de estruturas de confinamento de resíduos " Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

Nancey, A., Imbert, B., and Robinet, A. (2002). "Thick and abrasion resistant geotextile for use under ballast in railways structure." *Proc. 7 th International Conference on Geosynthetics*, Nice, França, 1191-1194.

NP EN ISO 9862: 2007 (Ed. 1) "Geossintéticos. Amostragem e preparação de provetes (EN ISO 9862: 2005 IDT)."

NP EN ISO 11058: 2003 (Ed.1) "Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento (ISO 11058: 1999). (EN ISO 11058: 1999)."

NP EN ISO 12956: 2006 (Ed.1) "Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da dimensão característica da abertura (ISO 12956: 1999). (EN ISO 12956: 1999)."

NP EN ISO 12958: 2005 (Ed.1) "Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano (ISO 12958: 1999). (EN ISO 12958: 1999)."

NP EN ISO 13427: 2006 (Ed.1) "Geotêxteis e produtos relacionados – Simulação de dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante) (ISO 13427: 1998) (EN ISO 13427: 1998 IDT)."

Pimentel, K. C. A., Bathurst, R. J., and Palmeira, E. M. (2010). "Geosynthetics in Railroads." International Geosynthetics Society.

Pinho-Lopes, M., and Lopes, M. L. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos*, FEUP Edições, ISBN: 978-972-752-120-3.

Pinho-Lopes, M., and Lopes, M. L. "Efeito da DDI de geossintéticos no seu comportamento ao arranque - Ensaio laboratoriais ".

Pinho-Lopes, M., and Lopes, M. L. (2010). "Influence of damage during installation on the hydraulic behaviour of geotextiles." *9th International Conference on Geosynthetics* Brazil.

Pinto, A. E. d. S. (2005). "Aplicação de Geossintéticos em Linhas Férreas, Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais, ." Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

Raymond, G. P. (1999). "Railway rehabilitation geotextiles." 213-230.

Rosete, A. J. d. C. P. (2010). "Durabilidade de Geossintéticos em Obras Ferroviárias – Abrasão e DDI." Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Shukla, S. K. (2002). *Geosynthetics and their applications*, Thomas Telford Services Ltd.

Silva, A. (2010). "Danificação durante a instalação em obra de drenos geossintéticos." Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Van Dine, D., Williams, S. E., and Raymond, G. P. (1982). "An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles, ." *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, USA, pp.811-816.

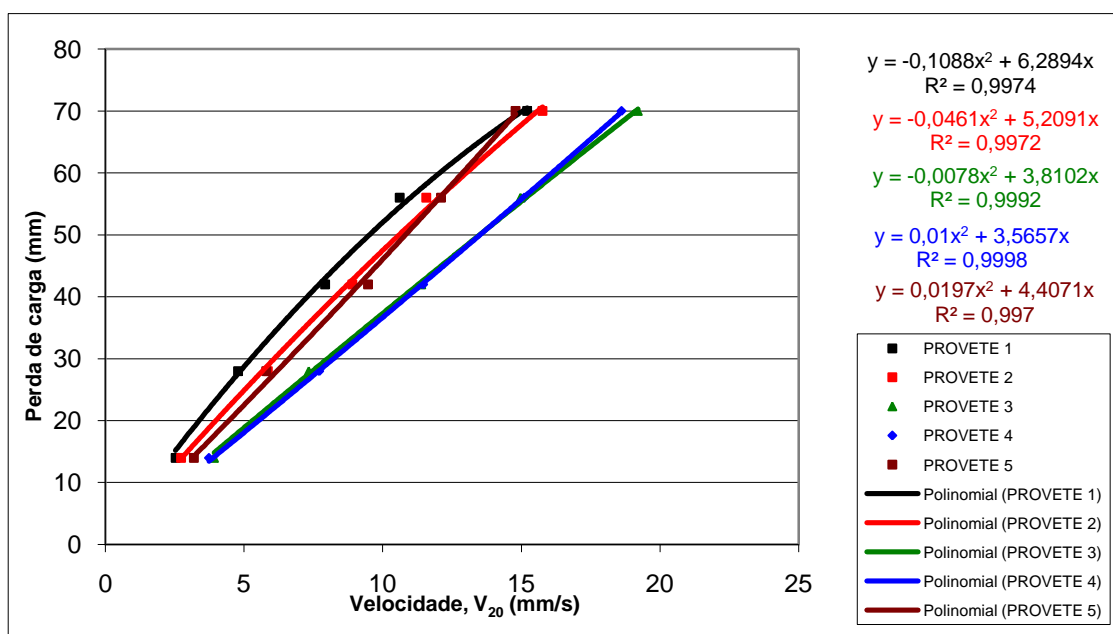
Vantrain, J., and Puig, J. (1969). ""Experimentation Bidim". "

ANEXOS

ANEXO A

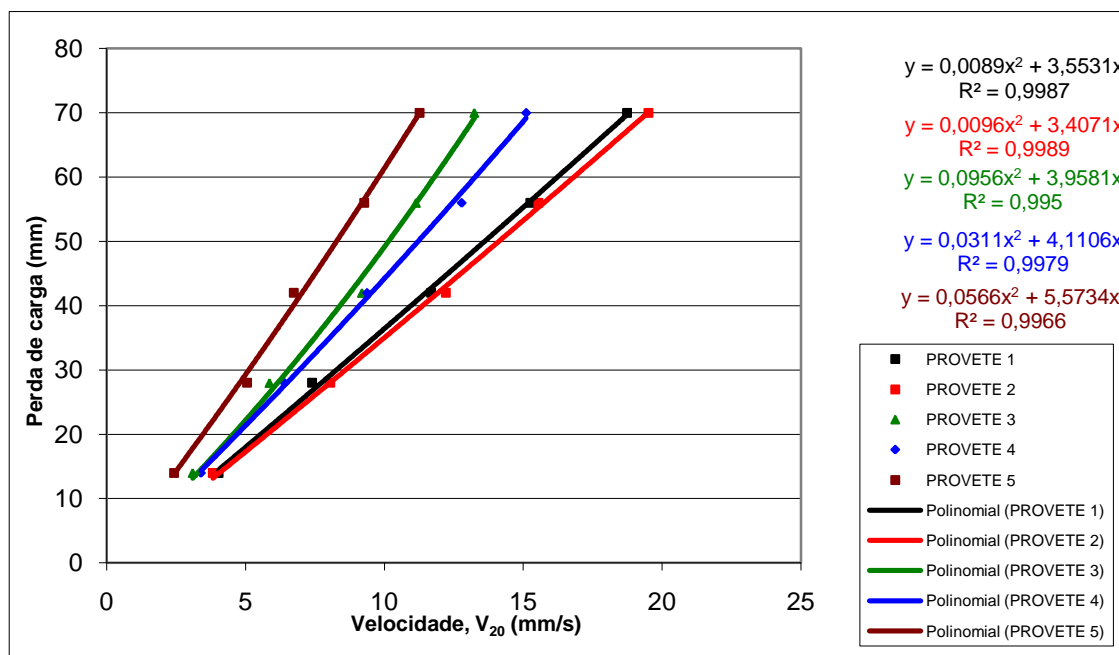
Relação entre a perda de carga e a velocidade de escoamento para o geotêxtil GTX – gráficos de interpolação e quadros resumo.

Provetes Intactos



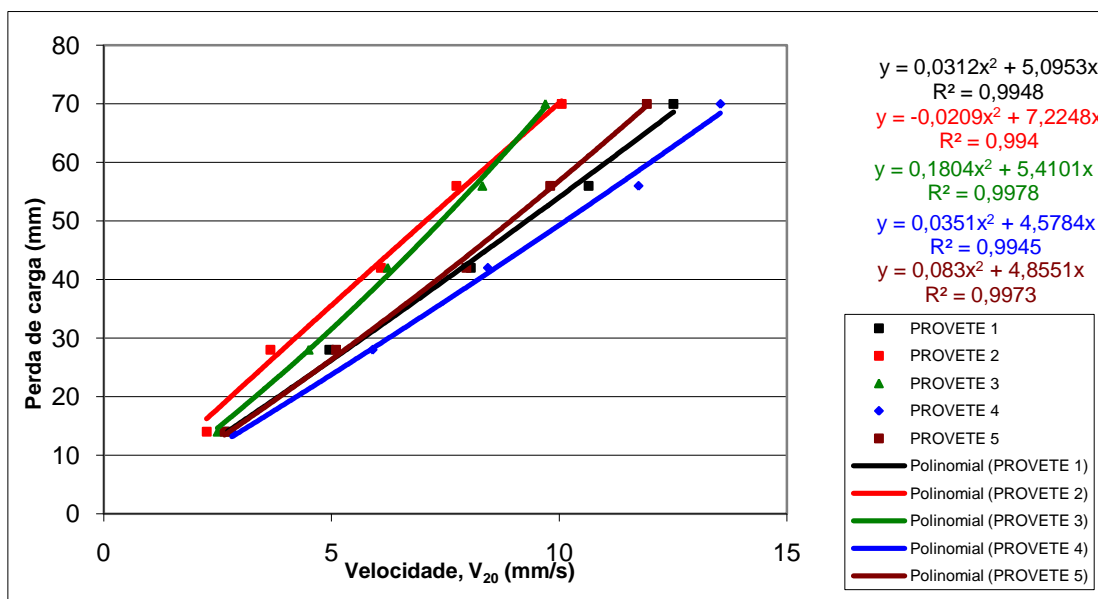
Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(Δh =50 mm)
1	2,53	4,78	7,92	10,61	15,21	9,52	0,19
2	2,72	5,85	8,91	11,5	15,77	10,59	0,21
3	3,92	7,33	11,40	14,97	19,21	13,50	0,27
4	3,73	7,71	11,46	15,10	18,62	13,51	0,27
5	3,19	5,80	9,47	12,10	14,79	10,82	0 22
Média	3,22	6,30	9,83	12,87	16,72	11,59	0,23
Desvio Padrão	0,61	1,21	1,56	2,05	2,04	1,82	0,04
Coeficiente de Variação (%)	18,89	19,17	15,88	15,92	12,22	15,68	15,68

Provetes sujeitos a DDI



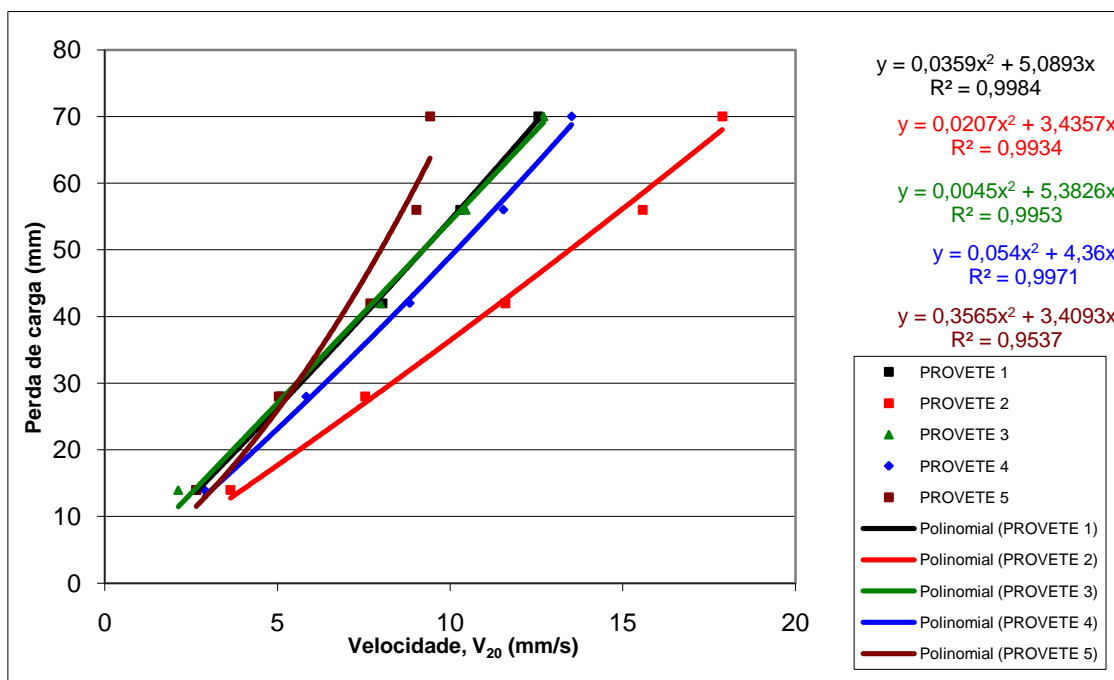
Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(ΔH =50 mm)
1	4,03	7,40	11,68	15,26	18,73	13,61	0,27
2	3,82	8,05	12,21	15,55	19,50	14,11	0,28
3	3,10	5,86	9,19	11,14	13,24	10,15	0,20
4	3,40	6,40	9,38	12,78	15,10	11,21	0,22
5	2,43	5,06	6,73	9,27	11,27	8,28	0,17
Média	3,36	6,55	9,84	12,80	15,57	11,47	0,23
Desvio Padrão	0,63	1,19	2,20	2,68	3,52	2,43	0,05
Coeficiente de Variação (%)	18,86	18,18	22,32	20,97	22,61	21,17	21,17

Provetes sujeitos a abrasão



Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(ΔH =50 mm)
1	2,72	4,95	8,06	10,64	12,51	9,29	0,19
2	2,26	3,66	6,08	7,74	10,05	7,06	0,14
3	2,50	4,50	6,23	8,31	9,70	7,41	0,15
4	2,81	5,90	8,43	11,74	13,54	10,13	0,20
5	2,65	5,10	7,96	9,80	11,92	8,93	0,18
Média	2,59	4,82	7,35	9,65	11,54	8,57	0,17
Desvio Padrão	0,22	0,82	1,10	1,64	1,63	1,29	0,03
Coeficiente de Variação (%)	8,39	17,09	15,03	17,04	14,15	15,11	15,11

Provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão

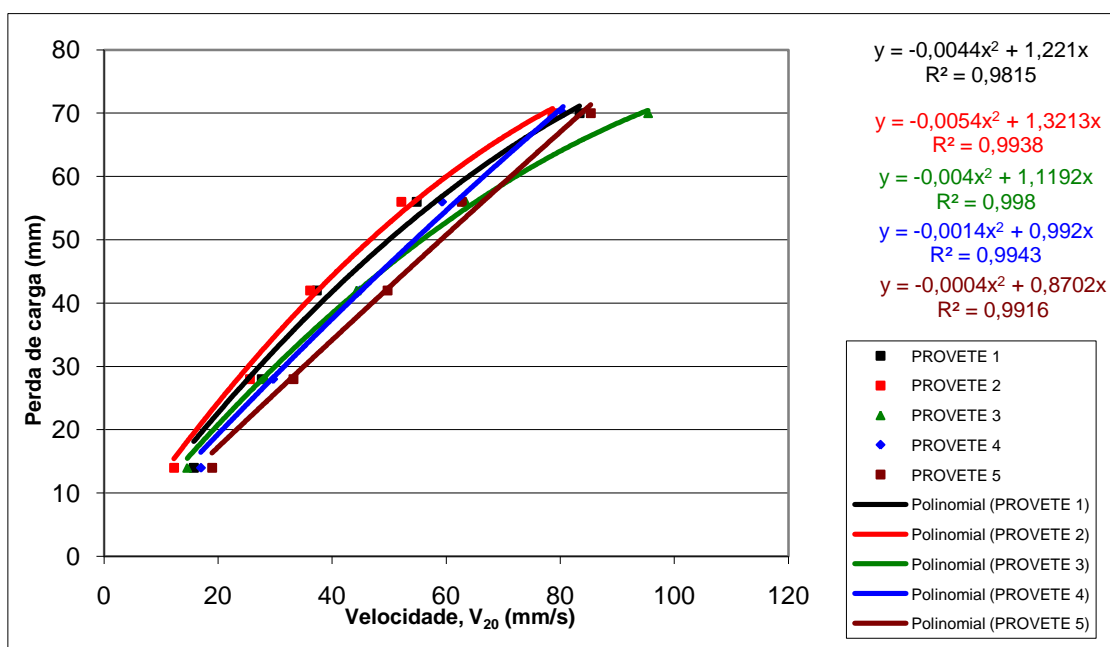


Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(ΔH =50 mm)
1	2,64	5,10	8,04	10,29	12,56	9,22	0,18
2	3,64	7,54	11,60	15,58	17,88	9,32	0,19
3	2,13	5,15	7,97	10,45	12,71	9,22	0,18
4	2,88	5,83	8,83	11,54	13,52	10,18	0,20
5	2,65	5,03	7,69	9,02	9,42	7,99	0,16
Média	2,79	5,73	8,83	11,38	13,22	9,19	0,18
Desvio Padrão	0,55	1,06	1,61	2,51	3,04	0,78	0,02
Coeficiente de Variação (%)	19,70	18,50	18,19	22,09	23,00	8,51	8,51

ANEXO B

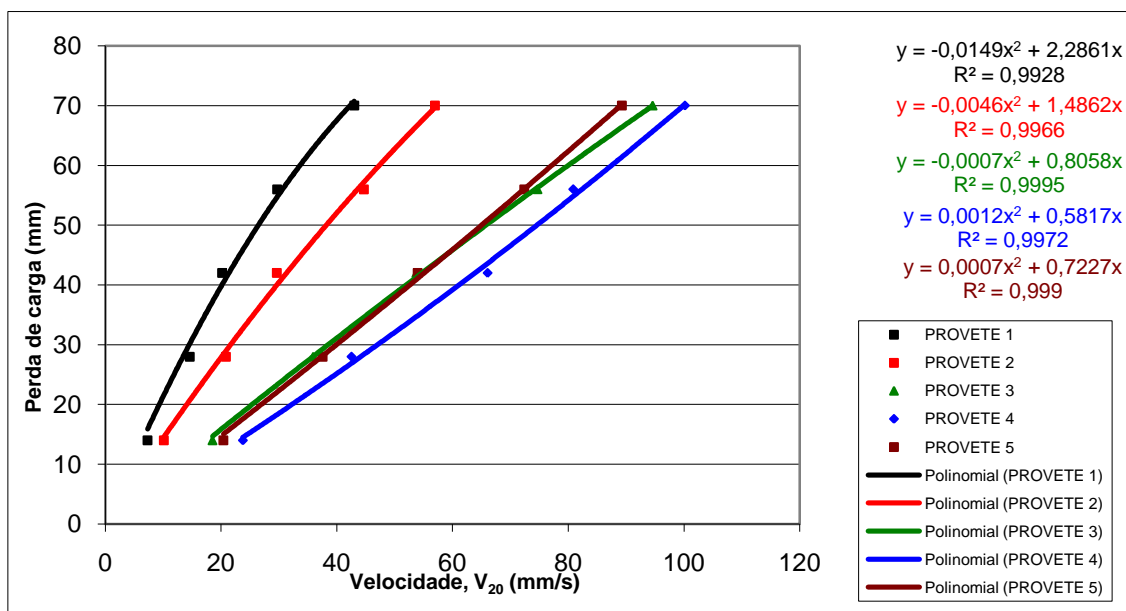
Relação entre a perda de carga e a velocidade de escoamento para o geotêxtil GTX,– gráficos de interpolação e quadros resumo.

Provetes intactos



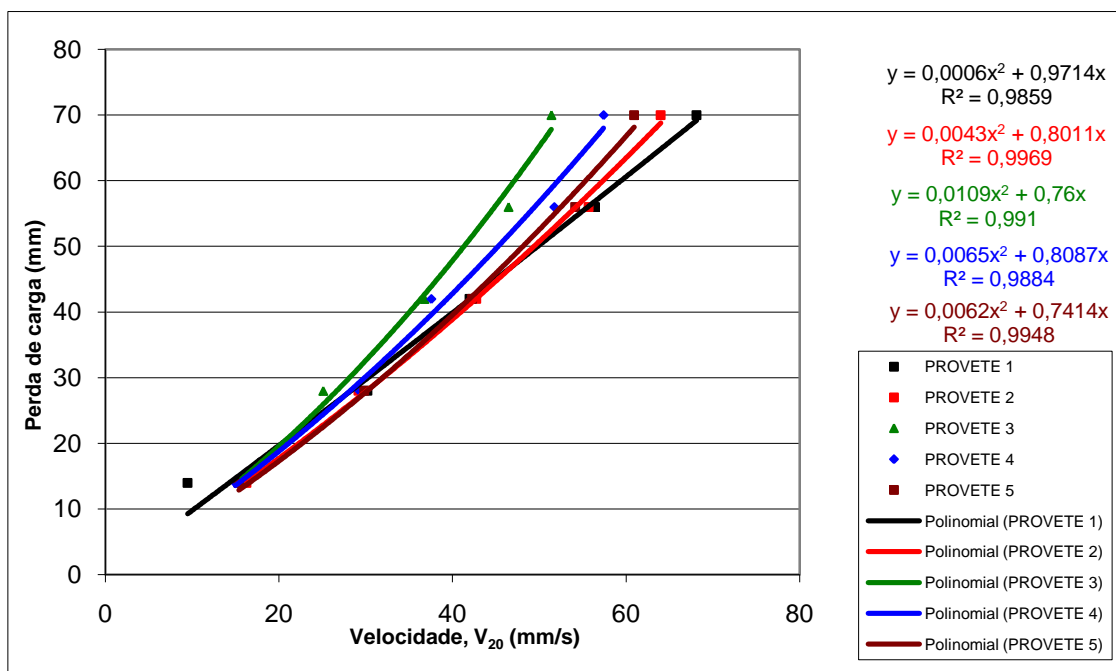
Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(Δh =50 mm)
1	15,75	27,67	37,31	54,82	83,39	49,94	1,00
2	12,28	25,58	36,13	52,15	78,62	46,79	0,94
3	14,60	28,34	44,29	63,43	95,38	55,80	1,12
4	16,98	29,65	44,83	59,27	80,53	54,61	1,09
5	18,95	33,22	49,74	62,74	85,36	59,06	1,18
Média	15,71	28,89	42,46	58,48	84,65	53,24	1,06
Desvio Padrão	2,50	2,83	5,67	4,92	6,53	4,87	0,10
Coefficiente de Variação (%)	15,94	9,80	13,35	8,41	7,71	9,15	9,15

Provetes sujeitos a DDI



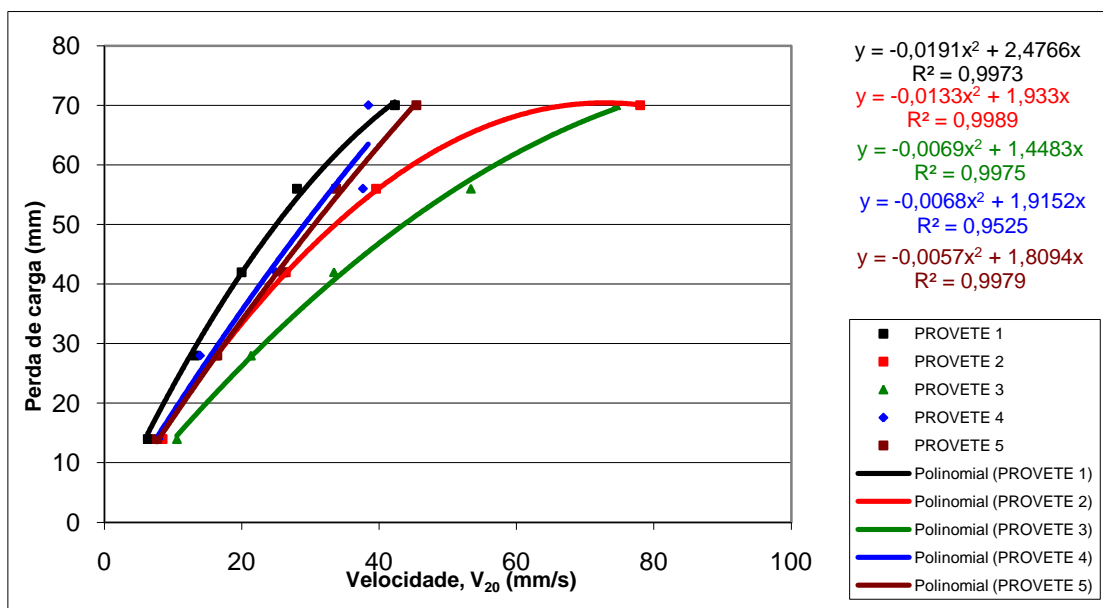
Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹) (Δh =50 mm)
	14	28	42	56	70		
1	7,30	14,58	20,19	29,69	43,01	26,42	0,53
2	10,10	20,83	29,65	44,66	56,95	38,15	0,76
3	18,52	35,92	53,74	74,68	94,57	65,81	1,32
4	23,75	42,52	66,06	80,86	100,18	74,50	1,49
5	20,40	37,52	53,94	72,41	89,28	65,08	1,30
Média	16,01	30,27	44,72	60,46	76,80	53,99	1,08
Desvio Padrão	7,01	11,94	19,04	22,12	25,27	20,58	0,41
Coeficiente de Variação (%)	43,75	39,42	42,59	36,59	32,90	38,12	38,12

Provetes sujeitos a abrasão



Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(Δh =50 mm)
1	9,47	30,18	41,96	56,41	68,11	49,93	1,00
2	16,25	29,17	42,72	55,68	63,97	49,34	0,99
3	15,71	25,11	36,77	46,44	51,38	41,31	0,83
4	14,97	29,28	37,57	51,73	57,40	45,32	0,91
5	15,37	29,82	42,26	54,14	0,92	48,10	0,96
Média	14,35	28,71	40,25	52,88	60,36	46,80	0,94
Desvio Padrão	2,77	2,05	2,85	4,02	6,38	3,55	0,07
Coeficiente de Variação (%)	19,31	7,15	7,07	7,60	10,57	7,58	7,58

Provetes sujeitos ao efeito conjunto de DDI e abrasão



Provete	V ₂₀ (mm/s)					VI _{H50} (valor interpolado)	Permissividade
	Perda de Carga (mm)						ψ (s ⁻¹)
	14	28	42	56	70		(Δh =50 mm)
1	6,32	13,16	19,96	28,06	42,30	25,01	0,50
2	8,45	16,22	26,42	39,57	77,99	33,66	0,67
3	10,56	21,33	33,42	53,35	74,49	43,57	0,87
4	7,89	13,94	25,00	37,63	38,42	29,12	0,58
5	7,65	16,43	26,04	33,72	45, 1	30,58	0,61
Média	8,18	16,22	26,17	38,46	55,72	32,39	0,65
Desvio Padrão	1,55	3,19	4,81	9,41	18,93	6,98	0,14
Coeficiente de Variação (%)	18,90	19,66	18,38	24,46	33,98	21,55	21,55